

PARAMETRIZACIÓN DE BANCO DE ENTRENAMIENTO EN  
VARIABLES INDUSTRIALES PARA IMPLEMENTAR MODELOS DE  
CONTROL EN EL LABORATORIO DE RELEVACIÓN

DYLAN ANDRÉS ALZATE RODRÍGUEZ  
ESTEBAN JARAMILLO CABRERA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA

2016

# Índice

Índice	2
Índice de figuras	5
Índice de cuadros	7
1. Introducción	8
2. Planteamiento del problema	8
3. Justificación del problema	10
4. Objetivos	11
4.1. Objetivo general . . . . .	11
4.2. Objetivos específicos . . . . .	11
5. Materiales y métodos	13
5.1. 1. Descripción y configuración de componentes del banco de entrenamiento . . .	13
5.2. Sensores . . . . .	15
5.2.1. Sensor Pt100 y Sitrans TH100 . . . . .	15
5.2.2. Sensor ultrasonido U-GAGE Serie T30 con salidas analógicas y discreta .	16
5.3. Dispositivos para el control . . . . .	17
5.3.1. Controlador de flujo/nivel y presión MC 5438 - 301 000 . . . . .	18



5.3.2.	Controlador de temperatura MC 5438 - 201 000 . . . . .	18
5.4.	Actuadores del sistema . . . . .	20
5.4.1.	Calefactor resistivo y relé de estado sólido SSR . . . . .	20
5.4.2.	Válvula solenoidal proporcional servo-accionada de dos vías tipo EV260B . . . . .	20
<b>6.</b>	<b>Dinámica y caracterización del sistema</b>	<b>21</b>
6.1.	Sistema de primer orden . . . . .	21
6.2.	Modelo de un sistema de primer orden . . . . .	22
<b>7.</b>	<b>Estrategias de control</b>	<b>27</b>
7.1.	Sistemas de control en lazo abierto . . . . .	27
7.2.	Sistemas de control en lazo cerrado . . . . .	29
7.3.	Tipos de modelos de control . . . . .	30
7.3.1.	Control ON-OFF . . . . .	31
7.3.2.	Modelo de control PID . . . . .	33
7.4.	Método de la respuesta al escalón de Ziegler Nichols . . . . .	36
7.5.	Conversión de los parámetros PID a parámetros PB; $T_i$ , $T_d$ . . . . .	38
<b>8.</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>39</b>
8.1.	Construcción y caracterización de las dinámicas de los sistemas . . . . .	39
8.1.1.	Modelado del sistema de temperatura . . . . .	39
8.1.2.	Modelado del sistema de nivel de líquido . . . . .	41
8.2.	Implementación de un control ON OFF . . . . .	43

8.2.1. Control ON OFF para la temperatura del sistema con dispositivo maxthermo . . . . .	44
8.2.2. Control ON OFF para el nivel del sistema con dispositivo Maxthermo . .	45
8.3. Control ON OFF con banda utilizando un autómata Twido Sneyder para la temperatura del sistema . . . . .	46
8.4. Implementación de controladores PID en dispositivos maxthermo . . . . .	46
8.4.1. Control proporcional integral derivativo para la temperatura del sistema	47
8.4.2. Control proporcional integral derivativo para el nivel del sistema . . . . .	50
8.5. Elaboración de guías para el desarrollo de las prácticas . . . . .	53
<b>9. Conclusiones, recomendaciones y aportes</b>	<b>55</b>
<b>Referencias</b>	<b>57</b>

# Índice de figuras

1.	Banco hidraulico para implementación de control . . . . .	14
2.	Sistema dinámico con entrada, perturbación y salida . . . . .	22
3.	Señal de entrada del Sistema $u(t)$ y salida . . . . .	23
4.	Función de transferencia del sistema . . . . .	25
5.	Respuesta de un sistema de primer orden a un escalón unitario . . . . .	26
6.	Esquema de control de lazo abierto . . . . .	28
7.	Esquema de control de lazo cerrado . . . . .	29
8.	Esquema de control de ON-OFF . . . . .	32
9.	Respuesta al escalón . . . . .	37
10.	Implementación del sistema de temperatura en Simulink . . . . .	40
11.	Dinámica del sistema de temperatura real y calculada . . . . .	41
12.	Implementación del sistema de nivel en Simulink . . . . .	42
13.	Dinámica del sistema nivel real y calculado . . . . .	43
14.	Implementación control 'ON OFF' del sistema de temperatura . . . . .	44
15.	Implementación control 'ON OFF' del sistema de nivel . . . . .	45
16.	Implementación control 'ON OFF con banda' del sistema de temperatura . . . . .	46
17.	Constantes 'T y L' del sistema de temperatura . . . . .	47
18.	Implementación control 'PI' del sistema de temperatura . . . . .	48
19.	Implementación control 'PID' del sistema temperatura . . . . .	49

20.	Constantes 'T y L' del sistema de nivel . . . . .	50
21.	Implementación control 'P' del sistema de nivel . . . . .	51
22.	Implementación control 'PI' del sistema de nivel . . . . .	52
23.	Implementación control 'PID' del sistema de nivel . . . . .	53

# Índice de cuadros

1.	Modelos de control . . . . .	31
2.	Resumen de Características de modelos de Control . . . . .	36
3.	Parámetros de PID con método de escalón de Ziegler Nichols . . . . .	38
4.	Controladores PID de temperatura . . . . .	48
5.	Controladores PID del nivel . . . . .	51

# 1. Introducción

El proceso de formación de los ingenieros electricistas de la Universidad Tecnológica de Pereira debe estar orientado en alguna medida y en ciertas áreas, a poder confrontar los conocimientos adquiridos en la teoría con una implementación práctica de los mismos a través de diferentes herramientas. Teniendo en cuenta esta premisa y aprovechado que el programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira cuenta con un banco de entrenamiento con las principales variables industriales; se desarrolla un levantamiento de los componentes de dicho banco, definiendo claramente los sensores, los actuadores y demás elementos que la componen.

Después de realizar este levantamiento se procede a desarrollar una metodología para la obtención de la dinámica tanto de la variable de temperatura como de la variable de nivel de líquido para construir a partir de estos diferentes modelos de control que permitan mejorar sustancialmente dicha dinámica, esto se hace a través de diferentes herramientas como son la tarjeta de adquisición de datos de la *National Instruments* NI-DAQ 6009, que junto con el software *MATLAB* permite la adquisición de los datos en tiempo real y el posterior tratamiento de los datos para la obtención de la dinámica del sistema y diseño de los diferentes controladores.

Finalmente se presentan una serie de guías de laboratorio para que los estudiantes puedan realizar diferentes prácticas en el banco de entrenamiento.

# 2. Planteamiento del problema

En la industria, las mediciones de variables físicas se efectúan fundamentalmente con el propósito de controlar o regular su valor de tal manera que permanezca en una magnitud predeterminada durante el transcurso del tiempo o para que sigan un perfil determinado[1]. En este último caso se controla la magnitud de la variable y sus integrales y derivadas[2].

Los estudiantes del programa de ingeniería eléctrica durante su proceso de formación adquieren conocimientos teóricos en áreas como control y automatización. Estos conocimientos adquiridos

permiten identificar, simular, parametrizar y controlar distintos tipos de procesos industriales.

Generalmente los problemas planteados en la cátedra relacionan las variables más utilizadas a nivel industrial como son temperatura, presión y nivel[3]. Estos conocimientos se quedan en lo abstracto de la teoría y no existen prácticas que permitan afianzar los saberes y adquirir habilidades y destrezas que puedan aumentar la competitividad y a su vez tener una formación más integral para enfrentar diferentes retos que se puedan presentar en el ámbito laboral, personal o social.

Es importante entender, analizar e interpretar con mayor facilidad el comportamiento de las distintas clases de sistemas que involucran las variables más importantes que pueden ser representadas, manipuladas e interpretadas a través de modelos de control[4].

El programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira, cuenta con dos bancos para el control de nivel de líquido y control de temperatura, que actualmente no están siendo utilizados debido a que no se tiene una caracterización de la planta, además de no contar con guías de laboratorio que tengan en cuenta prácticas que ayuden a desarrollar el contenido de las informaciones adquiridas en la teoría. Estos bancos, cuentan con el conjunto de sensores y actuadores que permiten la medición de las variables más comunes de la industria.

Es por esta razón y aprovechando que el laboratorio de relevación de la Universidad Tecnológica de Pereira cuenta con un banco de entrenamiento de las principales variables de control a nivel industrial, que se hace necesaria la determinación de la dinámica del mismo y así, plantear diferentes modelos de control; con ayuda de este banco y las variables disponibles se puede desarrollar un conjunto de prácticas de laboratorio que ayuden a los estudiantes a profundizar y afianzar sus conocimiento teórico-prácticos en donde se construya a través de una serie de datos tomados al sistema mediante sensores o transductores, la dinámica y parametrización de nivel y temperatura de líquido, para posteriormente implementar diferentes modelos de control tales como control ON- OFF y control PID, por medio de dispositivos controladores y autómatas programables.

### 3. Justificación del problema

Hoy en día, la evolución de los sistemas de producción de la sociedad ha llevado a que los procesos requieran cada vez más precisión. Para esto, se desarrollan modelos de sistemas de control que permitan obtener a la salida del sistema la variable deseada o un perfil determinado; en este sentido, surge la necesidad de implementar sistemas de control automáticos, de medición, prueba y monitoreo que requieren de la adquisición de una amplia variedad de señales, con los cuales se puedan desarrollar sistemas de producción con mayor rapidez y exactitud, lo cual genera una mejor calidad y eficiencia en los procesos. Los sensores y transductores existentes permiten medir muchas cantidades de variables físicas, de las cuales las más frecuentemente utilizadas son: temperatura, presión, caudal, proximidad y nivel [1].

La temperatura es una de las variables de mayor importancia en los procesos industriales, por medio de ella se dan numerosos procesos químicos en los que predomina la energía calorífica como agente catalizador, o simplemente como agente modificador de algunas propiedades físicas de gases y líquidos; igualmente, la variable de nivel de líquido permite realizar el almacenamiento de un producto a un volumen predeterminado, esto es importante a la hora de diluir o mezclar componentes ya sea para la industria química, textil, etc. [3].

La medida de presión en líquidos o gases es una de las más frecuentes, particularmente en control de procesos. La presión es una fuerza por unidad de superficie, los procesos de control de presión normalmente están relacionados con el nivel de líquido, cantidad de fuerza aplicada sobre por un sistema hidráulico o neumático, entre otros. La medida de caudal está presente en todos los procesos de transporte de materia y energía mediante fluidos, bien sea para el control de dichos procesos o como simple indicación, o bien con la finalidad de determinar tarifas, como sucede en los casos del agua, gas, gasolina o crudos, etc [4].

La determinación de la posición de objetos están presentes en procesos industriales como son la detección de cuerpos opacos, nivel de líquido y ubicación; en estos casos son necesarios los sensores de proximidad.



Debido a que las anteriores variables son las más comunes en la industria, se requiere adquirir cada vez más conocimientos y habilidades en el área de automatización y control, generando competencias en los estudiantes, competitividad y aportando valor agregado en las aplicaciones de los procesos industriales[3].

El programa de ingeniería eléctrica actualmente no cuenta con unas prácticas de laboratorio donde se puedan fortalecer y adquirir habilidades en el área de control, aplicado específicamente a la automatización, especialmente en la manipulación de las variables más utilizadas a nivel industrial, que ayuden a que el estudiantado desarrolle mayores competencias; pero dentro de sus equipos, cuenta con un banco de entrenamiento para las principales variables a nivel industrial como son temperatura y nivel, pero, desafortunadamente carecen de una identificación, adecuación, caracterización y parametrización para su adecuado funcionamiento. Además, hace falta determinar el alcance de este equipo, para la implementación de prácticas de laboratorio donde se tenga presente diferentes modelos de control.

## **4. Objetivos**

### **4.1. Objetivo general**

Acondicionar, caracterizar y parametrizar un banco de entrenamiento en las principales variables industriales, para generar competencias en el campo de la automatización y control de procesos en el Laboratorio de Relevación del programa de Ingeniería Eléctrica.

### **4.2. Objetivos específicos**

- Realizar levantamiento, acondicionamiento, configuración de componentes disponibles, definir restricciones y alcances del banco de entrenamiento disponible al interior del Laboratorio de Relevación Industrial.

- Construir la dinámica y/o caracterización de los diferentes elementos constitutivos del sistema.
- Modelar a nivel teórico y simular, las estrategias de control tipo ON-OFF y PID sobre las diferentes variables de proceso: nivel de líquido y temperatura.
- Implementar a nivel práctico los sistemas de control para las principales variables de proceso disponibles, empleando controlador lógico programable (PLC) y/o dispositivos controladores específicos.
- Elaborar guías para la correcta implementación y desarrollo de las prácticas de laboratorio.

## 5. Materiales y métodos

### 5.1. 1. Descripción y configuración de componentes del banco de entrenamiento

Actualmente la Universidad Tecnológica de Pereira cuenta con dos bancos de entrenamiento de las principales variables industriales (presión, temperatura y nivel), las cuales no se encuentran debidamente identificadas y parametrizadas para su correcto funcionamiento y poder desarrollar diferentes prácticas con las cuáles los estudiantes de Ingeniería Eléctrica puedan adquirir o afianzar sus conocimientos en las áreas de la relevación, automática y el procesamiento de señales.

La planta que se utilizó consta de un tanque de almacenamiento con un área transversal cuadrada de 25\*25cm, altura de 150cm y capacidad de almacenamiento de 93.75L, donde cada centímetro de altura equivale a 0.625L para el respectivo control.

La figura 1 muestra el banco de entrenamiento, donde se especificará posteriormente el modo de funcionamiento de cada uno de los elementos presentes en esta imagen.



- Tanque de almacenamiento de agua
- Tanque de control o planta
- Tubería de entrada de agua
- Tubería de salida de agua con su respectiva llave de paso manual
- Resistencia eléctrica para aumento de temperatura
- Transductor de Temperatura
- PT100 con variación entre 0-1000 ohmios
- Sitrans TH100
- Sensor ultrasónico para el control de nivel
- Medidor de nivel visual externo
- Moto bomba
- Regulador diferencial de caudal
- Conector de red trifásica con neutro
- Fuente de alimentación de 24 Voltios
- Breaker de protección
- Dispositivos controladores de Temperatura, nivel y presión

## 5.2. Sensores

### 5.2.1. Sensor Pt100 y Sitrans TH100

El sistema cuenta con un sensor Pt100 de temperatura que consiste en un alambre de Platino que a 0 °C tiene 100 ohm y que al aumentar la temperatura varia su resistencia eléctrica; el

sensor es adecuado a través de un convertidor de señal Sitrans TH100. Este dispositivo tiene la capacidad de transformar el valor de resistencia en un equivalente de corriente continua de 4 a 20mA independiente de la carga a través de conversor digital-analógico para posterior mente ser enviados al dispositivo controlador maxthermo [5].

Para realizar la vinculación del sensor resistivo y el convertidor de señal Sitrans TH100, se realizó una conexión de la Pt100 a 2 hilos, al convertidor se le asigna una fuente de alimentación externa; esta señal es trasformada en corriente continua y a su vez enviada al dispositivo controlador.

### **5.2.2. Sensor ultrasonido U-GAGE Serie T30 con salidas analógicas y discreta**

Debido a que la universidad cuenta con una alta gama de sensores, entre ellos el ultrasónico U-GAGE Serie T30 con salidas analógicas y discreta, el cual cumple con las características deseadas y que se ajusta a los requerimientos del banco de entrenamiento.

El U-GAGE Serie T30 con salidas analógicas y discreta, es un sensor ultrasónico fácil de usar, ideal para entornos exigentes; su programación es simple; Excelente para aplicaciones de medición, tales como la detección de los niveles de líquido en un tanque o, por ejemplo, la determinación de alturas de caja con fines de clasificación.

El sensor incluye una salida análoga y discreta, que puede ser programado de forma independiente con diferentes límites de la ventana o una combinación con límites idénticos. Cada salida tiene la opción de ser fijado con un punto de ajuste de detección dentro de una ventana de 10 mm [6].

Los límites de detección para el nivel se programaron de la siguiente manera:

1. Seleccionar el tipo de salida (analógico o discreto) y mantener pulsado el botón correspondiente hasta que el led verde de alimentación se apaga y el led amarillo de salida adecuada se pone en ON. Esto indica que el sensor está a la espera para el primer límite.

2. Coloque el objetivo para el primer límite y brevemente clic en el mismo botón. Con eso se programa el primer límite del sensor. El led de salida de color amarillo parpadeará para reconocer el primer límite; ahora está a la espera para el segundo límite.
3. Coloque el objetivo para el segundo límite y clic en el botón de nuevo. Con esto se programa el segundo límite. El led de salida de color amarillo se apaga y el led verde se enciende; el sensor se encuentra ahora en el modo de funcionamiento normal.
4. Repita el procedimiento para la otra salida (analógica o discreta) si se desea una segunda salida.

NOTA: mantenga presionado el mismo botón mayor a 2 segundos (antes de programar el segundo límite) para salir del modo de programa sin guardar los cambios. El sensor volverá al último programa guardado.

Para el control de nivel del tanque, los límites se programaron de la siguiente forma:

1. Con el tanque vacío se posiciona el sensor para el primer límite y se presiona durante 5 segundos el botón análogo; de esta forma se programa el nivel de máxima longitud y nivel mínimo de agua.
2. Se llena el tanque al máximo y se presiona durante 5 segundos el botón análogo; de esta forma se programa el nivel de mínima longitud y nivel máximo de agua.

### **5.3. Dispositivos para el control**

El banco de entrenamiento está equipado con tres dispositivos controladores que pueden ser manipulados y programados manualmente, con los cuales podemos controlar la temperatura, nivel y presión. Además de un autómata programable Schneider Twido.

Los dispositivos controladores cuentan con una información codificada en letras, que indica las variables que puede manejar.



### 5.3.1. Controlador de flujo/nivel y presión MC 5438 - 301 000

- $B \rightarrow 3$  : *CORRIENTE DE 4 A 20mA SALIDA 1*
- $C \rightarrow 0$  : *NONE SALIDA 2*
- $D \rightarrow 1$  : *ALARMA 1*

Este dispositivo sufrió una serie de modificaciones desde la parte hardware; donde se soldaron unos pines, para que en sus terminales de entrada analógica reconocieran señales de 4 a 20mA; además de que se compensaron los valores de corriente obtenidos a través de la

### 5.3.2. Controlador de temperatura MC 5438 - 201 000

- $B \rightarrow 2$  : *VOLTAJE, PULSO DE VOLTAJE 20VDC/20mA SALIDA 1*
- $C \rightarrow 0$  : *NONE SALIDA 2*
- $D \rightarrow 1$  : *ALARMA 1*

La entrada será una señal de 4 a 20mA, la cual proviene de un sitrans, donde 4mA traduce 0 °C y 20mA traduce 100 °C; para configurar esto en el controlador, se debe ingresar manualmente a la configuración input, donde se cargaran los siguientes datos:

- Input 1 selection (inP1) = lin (seleccionamos de la tabla 4 del documento del controlador el tipo de señal que vamos a obtener, para ambos casos nivel y temperatura, tipo lineal)
- Setting limit (LoSP) = 0 (este límite debe ser menor o igual al límite inferior de nuestra planta)
- High setting limit (HiSP) = 100 (este límite debe ser mayor o igual al límite superior de nuestra planta)



- Analog input range low (LoAn) = 0 (este valor debe ser el equivalente de temperatura mínimo que corresponde al valor mínimo del lazo de corriente de la señal de entrada analógica)
- Analog input range high (HiAn) = 100 (este valor debe ser el equivalente de temperatura máxima que corresponde al valor máximo del lazo de corriente de la señal de entrada analógica)
- Analog input scale low (A1LS) = 3601 (por defecto)
- Analog input scale high (A1HS) = A18E (por defecto)
- Unit selection (unit) = (se trabaja en grados Celsius)
- Decimal point (dp) = (se trabaja con dos puntos decimales)
- Digital filter (FiLt) = 0.6 (por defecto)
- Input 2 selecction (inP2) = non (por defecto)

La configuración de los parámetros del controlador (Cntl) se ingresaron de la siguiente manera tanto para el control de nivel como el de temperatura; la única variación son las constantes del PID y el ciclo del tiempo del PWM:

- Ouput 1 proportional band (P1) = (se ingresa el valor de la banda proporcional diseñado)
- Ouput 1 integral time (i1) = (se ingresa el valor del tiempo derivativo diseñado)
- Ouput 1 derivate time (d1) = (se ingresa el valor del tiempo integral diseñado)
- Ouput 1 cicle time (Ct1) = (es el periodo en segundos del pwm y se ingresa como 0 para salida de corriente de 4 a 20mA o 1 para salidas de pulsos de tensión (SSR) equivalente un periodo de 1 segundo)
- At offset (AtoF) = 0 (por defecto)

- Anti-reset windup (Ar) = 100 (por defecto)

El laboratorio, además, de los dispositivos controladores cuenta con un autómatas programable Twido Sneyder electric de referencia TWD LCDE 40DRF, esto es una base compacta que cuenta con 24 entradas digitales, 14 salidas de relé y 2 salidas de transistor. También cuenta con un módulo de expansión de entradas y salidas analógicas de referencia TWD AMM 6HT que posee 4 entradas configurables a tensión (0-10V) o corriente (4-20mA) y 2 salidas también configurables a tensión (0-10V) o corriente (4-20mA).

Cabe anotar que software TwidoSuit para la programación de este PLC es de licencia abierta y se puede descargar de la red.

## **5.4. Actuadores del sistema**

### **5.4.1. Calefactor resistivo y relé de estado sólido SSR**

Para elevar la temperatura del líquido contenido en tanque de control, se cuenta con una resistencia calefactora la cual es alimentada a 208 voltios; debido a que el voltaje y la corriente consumidos son un poco elevados, este dispositivo se debe manipular a través de un relé de estado sólido o SSR (solid-state relays) este dispositivo usa transistores y tiristores o triac en sustitución de contactos metálicos, para controlar elevadas cargas de potencia a partir de las señales entregadas por el controlador que son de bajo voltaje e intensidad.

### **5.4.2. Válvula solenoidal proporcional servo-accionada de dos vías tipo EV260B**

La gama EV260B se compone de válvulas solenoides servoaccionadas de 2 vías con función de modulación proporcional y conexiones de tamaños comprendidos entre 1/4" y 3/4". Mediante la regulación continua de la corriente de la bobina, es posible situar la armadura en cualquier posición del tubo de la armadura y, de este modo, ajustar la bobina entre las posiciones de

cierre completo y apertura completa. La válvula se abre totalmente cuando la corriente de la bobina alcanza su máximo valor[7].

- Característica lineal en todo el rango de regulación.
- Rango de caudal completo: 0, 5 - 2, 7m<sup>3</sup>/h
- Presión diferencial: 0, 5 - 10bar
- Temperatura del medio: 10 - 80<sup>0</sup>C
- Temperatura ambiente: 50<sup>0</sup>C, *max*
- Protección de la bobina: IP67, áx.
- Viscosidad: 50cst, Máx.
- Señal piloto estándar de 4 - 20mA o de 0 - 10V

## 6. Dinámica y caracterización del sistema

### 6.1. Sistema de primer orden

Un sistema o proceso está formado por un conjunto de elementos existentes en el mundo real donde interactúan variables de diferentes tipos para producir señales observables; las señales observables que son de interés para el observador se denominan salidas del sistema, mientras que las señales que pueden ser manipuladas libremente por dicho observador son las entradas del mismo. El resto de señales que influyen en la evolución de las salidas pero no pueden ser manipuladas por el observador se denominan perturbaciones [8].

Para encontrar la dinámica de un sistema no es necesario conocer la relación interna de los diferentes elementos que la componen, para ello, en algunos casos solo se precisa comprender la relación que existe entre la entrada y la salida, lo que permite predecir la respuesta del sistema [1].

La figura 2, muestra un modelo básico de un sistema dinámico. Aquí, tanto la señal de entrada, salida y perturbación pueden ser únicas o un conjunto de señales.

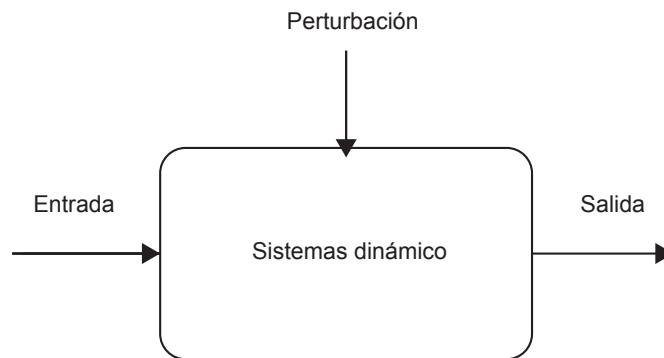


Figura 2: Sistema dinámico con entrada, perturbación y salida

El orden de los sistemas se define según el grado del polinomio del denominador de la función de transferencia del sistema o del número de elementos almacenadores de energía de la planta.

## 6.2. Modelo de un sistema de primer orden

Básicamente, un modelo es una herramienta que permite predecir el comportamiento de un sistema sin necesidad de experimentar sobre él [8].

Para poder modelar el sistema físico es necesario tener un conocimiento amplio del sistema que se quiere modelar y de sus rangos de operación.

En términos más explícitos, en la identificación de un sistema, se trata un método experimental que permite obtener el modelo del sistema a partir de datos reales recogidos de la planta bajo estudio.

Mediante el proceso de identificación se pretende obtener un modelo matemático del proceso. Para ello se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones sobre la señal de entrada:

- Relación señal ruido: Entrada lo suficientemente grande.
- Linealidad restringida a 1 punto de funcionamiento: entrada no demasiado grande.
- Señal de entrada excitante: que aporte información suficiente.

Una vez obtenido el modelo del sistema, el paso siguiente es la descripción matemática la cual se obtiene utilizando leyes físicas.

La salida de un proceso de un modelo primer orden, se obtiene al aplicarle una entrada escalón, la respuesta toma forma exponencial como se observa en la figura 3a,3b.

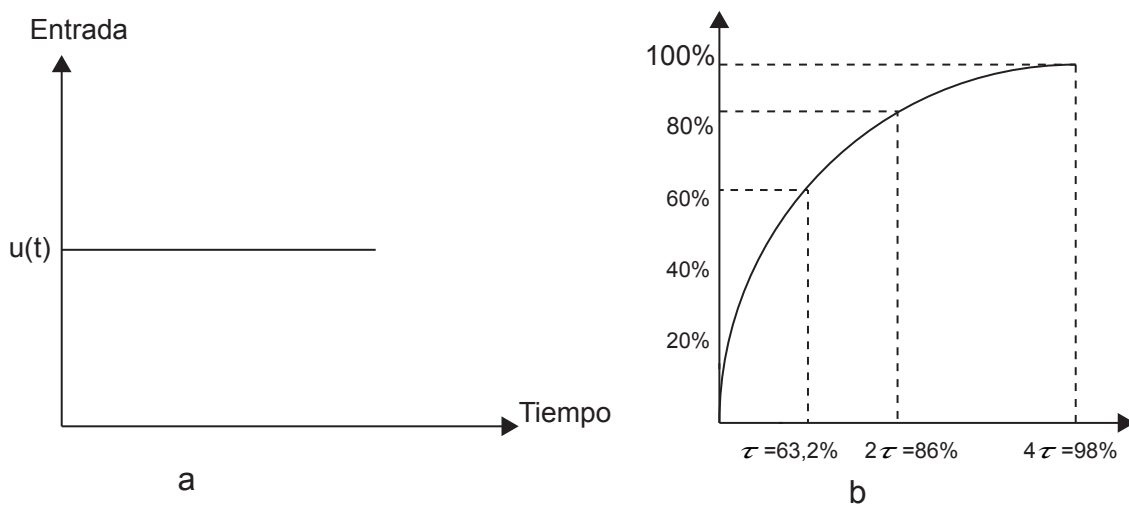


Figura 3: Señal de entrada del Sistema  $u(t)$  y salida

La dinámica de un proceso de primer orden se puede modelar como:

$$kU(t) = \tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) \quad (1)$$

Donde,

$\tau$  : Constante de tiempo

$U(t)$  : Entrada del proceso

$y(t)$  : Salida del proceso

$k$  : Ganancia en estado estacionario

A partir de esta ecuación, se puede obtener la función de transferencia del sistema, la cual se puede escribir de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{k}{(s + a)} = \frac{k/a}{(s/a + 1)} = \frac{k/a}{\tau s + 1} \quad \text{Ecuación canónica} \quad (2)$$

Donde,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad \text{Función de transferencia del sistema} \quad (3)$$

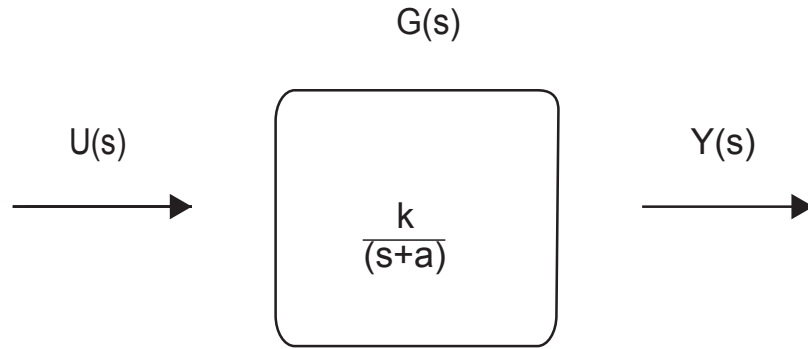


Figura 4: Función de transferencia del sistema

$$y(\infty) = \frac{k}{a} \Rightarrow k = y(\infty) * a \quad (4)$$

$y(\infty)$  es el valor al cual el sistema tiende a estabilizarse

$$\tau = \frac{1}{a} \quad (5)$$

$\tau$  se llama constante de tiempo de la respuesta, donde la constante de tiempo es el tiempo que toma el sistema en alcanzar el 63.2% valor final ante una señal de entrada escalón unitario. Esta constante de tiempo es importante debido a que el sistema se estabiliza después de  $4\tau$ , esto implica que si se quieren mejorar las características del sistema, debo modificar esta constante de tiempo[9].

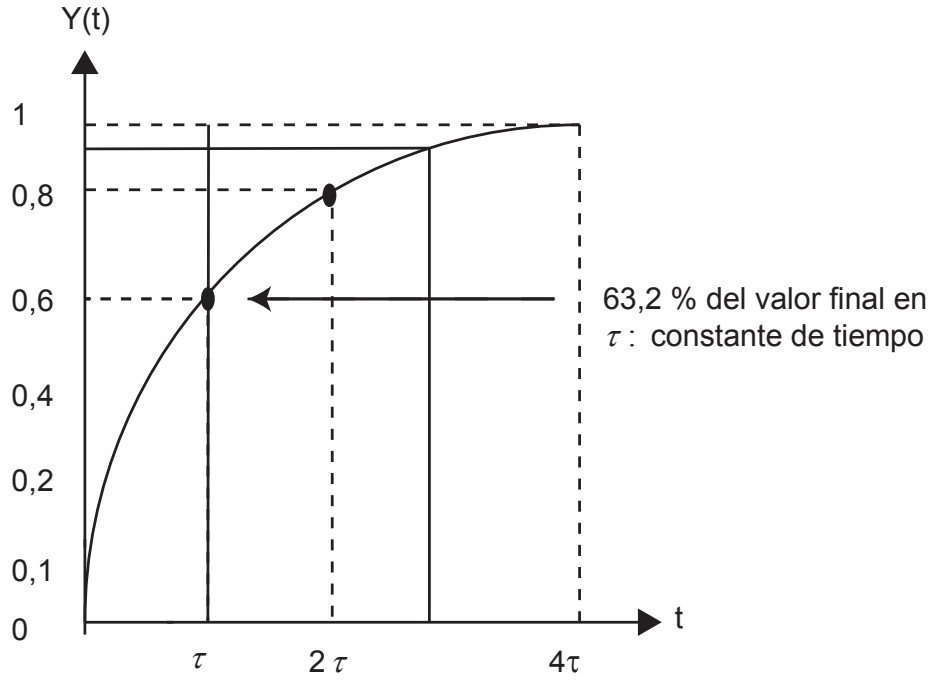


Figura 5: Respuesta de un sistema de primer orden a un escalón unitario

En los sistemas de primer orden se puede encontrar una serie de parámetros que permiten identificar cómo se comporta el sistema y que tan rápido responde ante cualquier cambio en la entrada; estos parámetros son: tiempo de levantamiento  $T_r$  y tiempo de asentamiento  $T_s$ , como se muestra en la figura 5[10].

El tiempo de levantamiento se define como el tiempo necesario para que la forma de onda pase de 0.1 a 0.9 de su valor final.

$$T_r = \frac{2,2}{a} \quad (6)$$

El tiempo de asentamiento se define como el tiempo necesario para que la respuesta alcance un error del  $2\%$  alrededor de su valor final.



$$T_s = \frac{4}{a} = 4\tau \quad (7)$$

## 7. Estrategias de control

Un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados buscados[11]

Hoy en día los procesos de control son síntomas del proceso industrial que estamos viviendo. Estos sistemas se usan típicamente en sustituir un trabajador pasivo que controla un determinado sistema (ya sea eléctrico, mecánico, etc.) con una posibilidad nula o casi nula de error, y un grado de eficiencia mayor que el de un trabajador. Los sistemas de control más modernos en ingeniería, automatizan procesos con base a muchos parámetros y reciben el nombre de controladores de automatización programables (PAC) [2].

La finalidad de un sistema de control es mantener cierta variable o variables de algún tipo, en un valor, o rango de valores previamente definidos, a través de los componentes de un sistema de control, en lazo cerrado, o en lazo abierto, según sea la necesidad de las personas o de un proceso de producción[12].

### 7.1. Sistemas de control en lazo abierto

Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

La forma más simple de control es a lazo abierto. El diagrama en bloques de la Figura 6 representa un sistema de lazo abierto básico. La energía se aplica al proceso mediante un

actuador. La calibración del actuador determina la cantidad de energía aplicada. El proceso usa esta energía para cambiar su salida. Cambiando la calibración del actuador se modifica el nivel de energía en el proceso y la salida resultante. Si todas las variables que pueden afectar la salida del proceso son estables, ésta será estable.

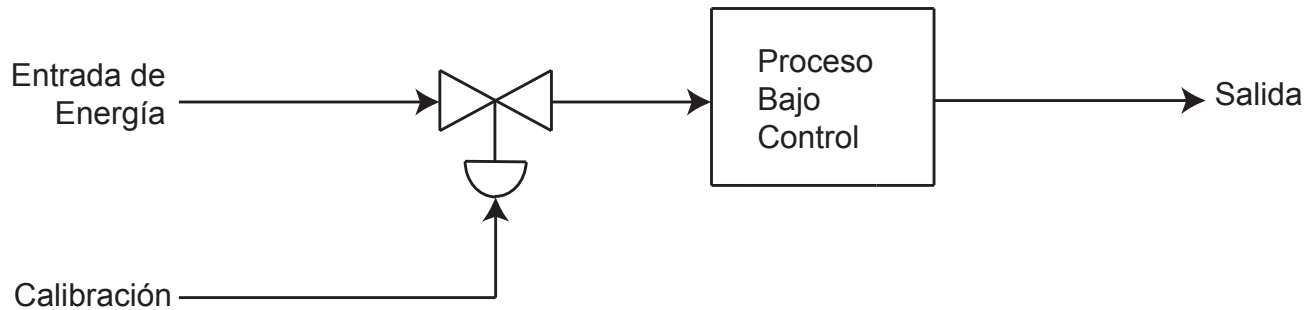


Figura 6: Esquema de control de lazo abierto

El concepto fundamental del control a lazo abierto es que la calibración del actuador, se basa en la comprensión del proceso. Estos sistemas, puede generar la salida deseada si se comprende exactamente el proceso y todas las condiciones que lo afectan permanecen constantes. Este tipo de sistemas no pueden garantizar la salida deseada, si el proceso se afecta por variaciones, aunque sean ligeras. No hay ningún mecanismo en un sistema a lazo abierto que reaccione cuando las perturbaciones afectan la salida [13].

Estos sistemas se caracterizan por:

- Ser sencillos y de fácil concepto
- Nada asegura su estabilidad ante una perturbación
- La salida no se compara con la entrada
- Ser afectado por perturbaciones, estas pueden ser tangibles o intangibles
- La precisión depende de la previa calibración del sistema [2].

## 7.2. Sistemas de control en lazo cerrado

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema, en la figura 7 se muestra un esquema de un sistema de control en lazo cerrado.

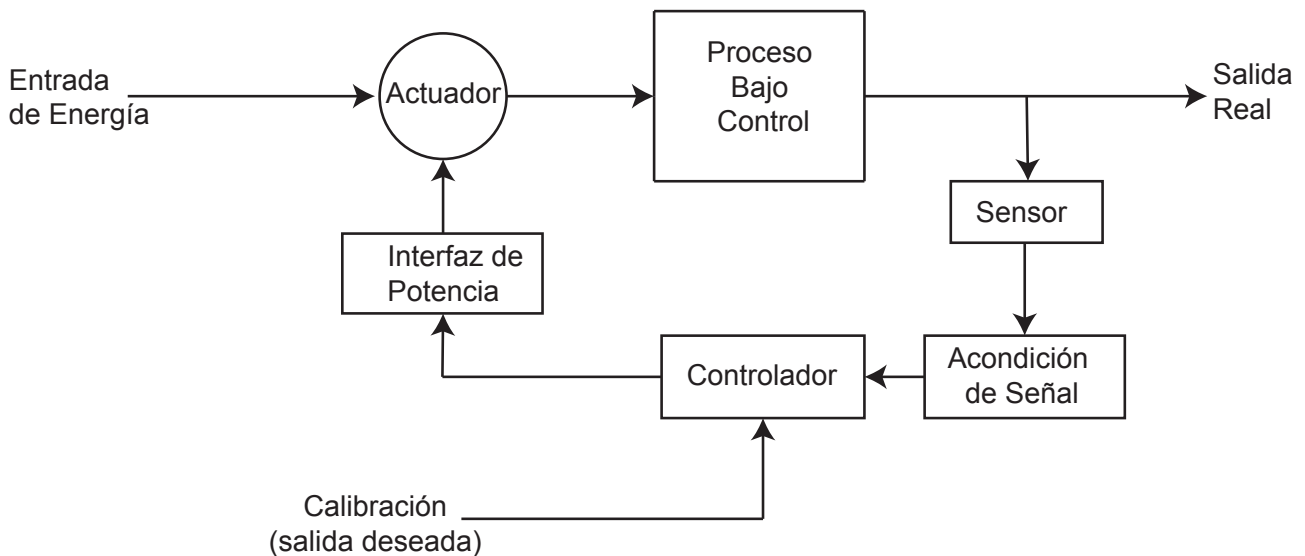


Figura 7: Esquema de control de lazo cerrado

En este diagrama, un Sensor apropiado está midiendo la salida real, el bloque de acondicionamiento de la señal toma la salida directa del sensor y la convierte en datos que el bloque controlador pueda interpretar. La calibración es un valor de entrada al controlador que representa la salida deseada del proceso. El controlador evalúa las dos entradas y basándose en esta medición acciona la interfaz de potencia. Este bloque provee el acondicionamiento de

señal para la salida del controlador [14].

Dado que la salida de este proceso está siendo monitoreada y su valor determina la configuración del actuador, se dice que se trata de un sistema a lazo cerrado realimentado según el siguiente diagrama de flujo. La entrada cambia la salida del proceso  $\Rightarrow$  la salida es monitorizada para realizar el control  $\Rightarrow$  la evaluación cambia la entrada  $\Rightarrow$  eso modifica la salida del proceso, etc.

### **Efectos de la realimentación**

Nos damos cuenta que la realimentación tiene un efecto muy importante como lo es la reducción del error entre la variable controlada y el punto de consigna, sin embargo no es el único efecto que tiene sobre el sistema de control, ya que también tiene la característica de variar algunos parámetros del sistema como lo son la ganancia global, estabilidad, ancho de banda, margen de fase, perturbaciones y sensibilidad.

## **7.3. Tipos de modelos de control**

El control automático desempeña una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, ya que el control automático se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura. Por lo cual la teoría de control es un tema de interés para muchos científicos e ingenieros que desean dar nuevas ideas para obtener un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos y disminuir tareas manuales o repetitivas[15].

Existen diversos controladores o modelos de control que dependen del nivel de complejidad del proceso que se desea controlar, el grado de precisión, nivel de estabilidad entre otros aspectos tales como redes neuronales, control adaptativo, control difuso, etc. En este proyecto sólo se hará referencia a los principales modelos de control ON-OFF y PID [16].

En los sistemas, se pueden desarrollar diferentes tipos de modelos de control, según las necesidades del usuario y el criterio del diseñador. Existen cinco modos de control común, estos son ON-OFF (encendido- apagado), ON-OFF con banda diferencial, proporcional, integral y derivativa. Las características fundamentales que distinguen cada modo de control están listadas

en el cuadro 1 .

<b>Modelo de Control</b>	<b>Evaluación</b>	<b>Acción</b>
ON-OFF	La variable está por encima o por debajo del valor deseado	La salida se enciende (ON) o apaga (OFF) completamente
ON-OFF con banda diferencial	La variable está por encima o por debajo de un rango definido por los límites inferior e superior	La salida se enciende (ON) o apaga (OFF) completamente para lograr que el valor medido permanezca dentro de ese rango
Proporcional	Qué tan lejos está la variable medida, del valor deseado	Toma un grado de acción relativo a la magnitud del error
Integral	El error aún se mantiene	Aumenta la fuerza de la acción mientras persista el error
Derivativo	Qué tan rápido se produce el error	Genera una respuesta basada en la velocidad de cambio de la señal de error (derivada)

Cuadro 1: Modelos de control

### 7.3.1. Control ON-OFF

Los controladores ON-OFF han sustituido a los relés convencionales utilizados en muchos procesos industriales. En lugar de disponer de pulsadores y relés para circuitos de enclavamiento y para el accionamiento de motores de la planta, con el correspondiente panel o cuadro de mandos (con los consiguientes cables de conexión), un controlador ON-OFF configurado en un PLC es una solución versátil, práctica y elegante, programado a través de un software desarrollado en un lenguaje especial, basado en la lógica de relés [11].

El modelo de control ON-OFF es también muy conocido como Encendido-Apagado o Todo-Nada. Para esta acción de control el elemento de actuación sólo tiene dos posiciones fijas que en la mayoría de los casos son apagados y encendido. Este control es relativamente simple y barato, por lo cual su uso es muy extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos [15].

Si tenemos una señal de salida del controlador  $u(t)$  y una señal de error  $e(t)$ , en el control de dos posiciones, la señal  $u(t)$  permanece en un valor ya sea máximo o mínimo, dependiendo de si la señal de error es positiva o negativa. De este modo,

$$u(t) = U1, \quad \text{para } e(t) > 0 \quad (8)$$

$$u(t) = U2, \quad \text{para } e(t) < 0 \quad (9)$$

La figura 8 muestra el diagrama a bloques de un controlador ON-OFF.

En donde  $U1$  y  $U2$  son constantes. Por lo general, el valor mínimo de  $U2$  es cero o menos  $U1$ .

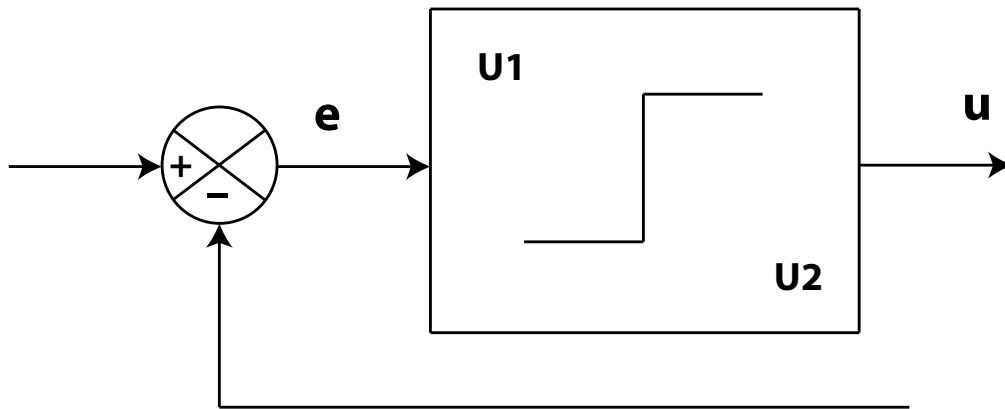


Figura 8: Esquema de control de ON-OFF

### 7.3.2. Modelo de control PID

Uno de los controladores industriales más utilizados es el conocido PID, que es la combinación de una acción de control Proporcional, una acción de control Integral y una acción de control Derivativo que se denomina modelo de control Proporcional Integral Derivativo. Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales.

La ecuación que describe relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  de la acción de control Proporcional Integral Derivativo está dada por:

$$u(t) = k_p(t) + k_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (10)$$

Aplicando la transformada de la place se tiene:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left( 1 + T_d + \frac{1}{T_i} \right) \quad (11)$$

A medida que la ganancia proporcional es mayor, menor desviación del error de control se requerirá para lograr el objetivo de control. Sin embargo, un aumento excesivo de esta ganancia puede tornar inestable al controlador. Esta acción se ve compensada por la adición de las componentes integral y derivativa. La acción integral garantiza que la tasa de cambio de la acción de control sea proporcional al error de control, lo que garantiza que la acción de control pueda ser distinta de cero aun cuando el error sea cero. Por su parte, la acción derivativa establece una acción proporcional a la rapidez de cambio de la variable de proceso y no a su valor, ocasionando respuestas iniciales más rápidas que las que se obtendrían sin esta acción [11].

### Modelo de Control Proporcional

El controlador Proporcional es en realidad un amplificador con ganancia ajustable. Este control reduce el tiempo de subida, incrementa el sobretiro y reduce el error de estado estable. Para una acción de control Proporcional la relación entre la salida del controlador.

$u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es :

$$u(t) = k_p e(t) \quad (12)$$

Donde  $k_p$  es la ganancia proporcional.

Si se aplica la transformada de Laplace se obtiene:

$$U(s) = k_p E(s) \implies \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \quad (13)$$

### Modelo de Control Integral

La acción de control Integral se denomina control de reajuste (reset). En un controlador integral la relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

$$\frac{du(t)}{dt} = k_i e(t) \implies u(t) = k_i \int_0^t e(t) \quad (14)$$

Donde  $k_i$  es una constante ajustable.

Si se duplica el valor de  $e(t)$ , el valor de  $u(t)$  varía dos veces más rápido. Para un error de cero, el valor de  $u(t)$  permanece estacionario.

Si se aplica la transformada de Laplace se obtiene:

$$U(s) = \frac{k_i}{s} E(s) \implies \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{k_i}{s} \quad (15)$$

Como se puede ver en la formula anterior el control Integral añade un polo en el origen, con lo cual el sistema se vuelve menos estable.

### Modelo de Control Proporcional Integral

El control Proporcional Integral decrementa el tiempo de subida, incrementa el sobre impulso y



el tiempo de estabilización, y tiene el efecto de eliminar el error de estado estable pero empeorará la respuesta transitoria.

El modelo de control Proporcional Integral se define mediante:

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(t) \quad (16)$$

En donde  $k_p$  es la ganancia proporcional y  $T_i$  se denomina tiempo integral.

El tiempo integral ajusta el modelo del control, mientras que un cambio en el valor de  $k_p$  afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El inverso del tiempo integral  $T_i$  se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto.

Si se aplica la transformada de Laplace se obtiene:

$$U(s) = k_p E(s) + \frac{1}{sT_i} E(s) \implies \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} \right) \quad (17)$$

### Modelo de Control Proporcional Derivativo

El modelo de control Proporcional Derivativo reduce el sobre impulso y el tiempo de estabilización, por lo cual tendrá el efecto de incrementar la estabilidad del sistema mejorando la respuesta del sistema. La relación de un controlador Proporcional Derivativo entre la salida  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  está dada por:

$$u(t) = k_p e(t) + k_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (18)$$

En donde  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_d$  es una constante denominada tiempo Derivativo

El modelo de control Derivativo, en ocasiones llamada control de velocidad, ocurre donde la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de

error. El tiempo Derivativo  $T_d$  es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción proporcional. La acción de control Derivativo tiene un carácter de previsión. Sin embargo, es obvio que una acción de control Derivativo nunca prevé una acción que nunca ha ocurrido.

Aunque la acción de control Derivativo tiene la ventaja de ser de previsión, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en el actuador [11].

Si se aplica la transformada de Laplace se obtiene:

$$U(s) = k_p E(s) + k_p s T_d E(s) \implies \frac{U(s)}{E(s)} = k_p (1 + s T_d) \quad (19)$$

El cuadro 2 resume las características de los controles mencionados, las correlaciones del cuadro mostrado no son muy precisas, porque  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  son dependientes entre sí, por lo cual este cuadro sólo debe ser tomada como una referencia.

<b>Tipo de Control</b>	<b>Tiempo de Subida</b>	<b>Sobre Impulso</b>	<b>Tiempo de estabilización</b>	<b>Error de estado estable</b>
Proporcional	Decrece	Crece	Cambio menor	Decrece
P. Integral	Decrece	Crece	Crece	Se elimina
P. Derivativa	Cambio menor	Decrece	Decrece	Cambio menor

Cuadro 2: Resumen de Características de modelos de Control

## 7.4. Método de la respuesta al escalón de Ziegler Nichols

Para obtener las constantes de los controladores PID, se pueden implementar diversos métodos, dependiendo de las condiciones del sistema analizar; para este caso ambas plantas a controlar se representan fielmente por modelos de primer orden, por este motivo se adoptó el método

de respuesta al escalón de Ziegler Nichols para el cálculo de las constantes necesarias de los diferentes controladores.

Dicho método consiste en caracterizar el sistema mediante dos parámetros  $L$  y  $T$ , los cuales se obtienen de la gráfica de magnitud contra tiempo por medio de la respuesta en lazo abierto; el procedimiento consiste en extender dos líneas rectas, la primera tangencial ala pendiente máxima presentada y las segunda tangencial al valor de establecimiento y encontrar el punto de corte entre las líneas y determinar los valores de  $T$  y  $L$  relativos a cada sistema como se aprecia en la figura 9

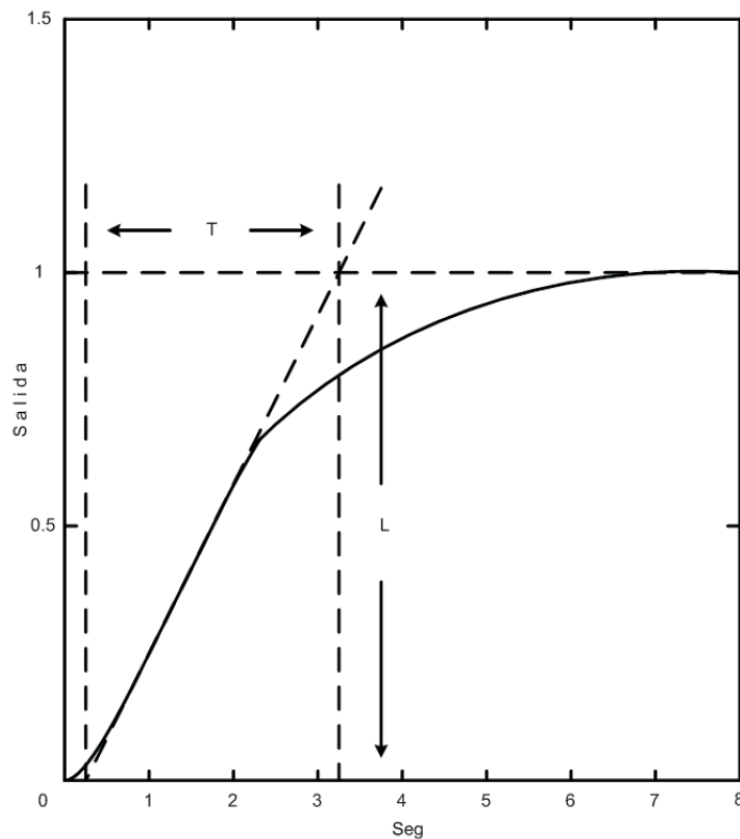


Figura 9: Respuesta al escalón

Según este procedimiento de sintonización los parámetros de los controladores pueden obtenerse de acuerdo al cuadro 3.

<b>Controlador</b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>K_i</math></b>	<b><math>K_d</math></b>
<b>P</b>	T/L	0	0
<b>PI</b>	0, 9*T/L	0, 3/L	0
<b>PID</b>	1, 2*T/L	0, 5/L	0,5*L

Cuadro 3: Parámetros de PID con método de escalón de Ziegler Nichols

### 7.5. Conversión de los parámetros PID a parámetros PB; Ti, Td

El método de respuesta al escalón de Ziegler Nichols nos entrega los parámetros, ganancia proporcional ( $k_p$ ), integral ( $k_i$ ) y derivativa ( $k_d$ ); los cuales se deben convertir a parámetros de tipo, banda proporcional (BP) tiempos integrales ( $T_i$ ) y tiempos derivativos ( $T_d$ ), debido a que estos son los requeridos por el controlador utilizado maxthermo. Dicha conversión se realiza de la siguiente manera [17].

- La ganancia proporcional puede ser expresada como banda proporcional (PB); la relación entre las dos está determinada por.

$$PB = 100\% / K_p$$

- La ganancia integral es el inverso del tiempo integral.

$$T_i = 1 / K_i$$

- La ganancia derivativa esta en unidades de tiempo.

$$T_d = K_d$$

## 8. Análisis de resultados

En este capítulo se consignaran y analizaran los resultados obtenidos para diferentes pruebas realizadas sobre las plantas, inicialmente se establecen los modelos de cada sistema, tanto para el nivel de líquido como el de temperatura, para proceder a implementar diferentes tipos de control tales como son el control ON OFF y terminando con los controladores PID.

Para el estudio del comportamiento del sistema de nivel como el de temperatura se manipulo la DAQ, enlazada con un algoritmo en matlab; en donde se tomaron una serie de datos que se consignaron en sus respectivas graficas (magnitud Vs tiempo) las cuales representan las respuestas ante las diferentes pruebas realizadas.

### 8.1. Construcción y caracterización de las dinámicas de los sistemas

Las plantas se modelaron como sistemas de primer orden sin retardo.

#### 8.1.1. Modelado del sistema de temperatura

El sistema modelado está compuesto por un tanque de almacenamiento de líquido, el cual se encuentra inicialmente con una altura de 20cm que equivalen 12,5L y tempera ambiente de 23°C; se debe tener en cuenta que debido a la altura sobre el nivel del mar de la ciudad donde nos encontramos, el agua hierve a una temperatura de 95°C.

Para la identificación del sistema se llevó el tanque al nivel deseado y se puso el calefactor a carga plena, se tomaron lecturas temperatura a través de la DAQ entregadas por el conjunto acondicionado entre la RDT y el Sitrans; durante un tiempo de un poco más de 2 horas (8000s) hasta que el sistema se estabilizo, dichos valores son obtenidos a través de un algoritmo en matlab se consignan en la gráfica azul (valor medido) de la figura 11.

Con valores obtenidos se calculó el delta de temperatura.

$$\Delta T = 95 - 23 = 72$$

Se calculó el valor de temperatura al cual se tenía el primer tao

$$T = 72 * 0,632 + 23 = 68,5$$

Con este valor se obtuvo gráficamente el tiempo del primer tao, en la gráfica negra de la figura [11](#).

$$\tau = 3270s$$

Con estos valores obtenidos del tiempo del tao y el delta de temperatura, se construyó en simulink la función de transferencia de primer orden como se observa en la figura [10](#); posteriormente se consigna en la gráfica roja de la figura [11](#).

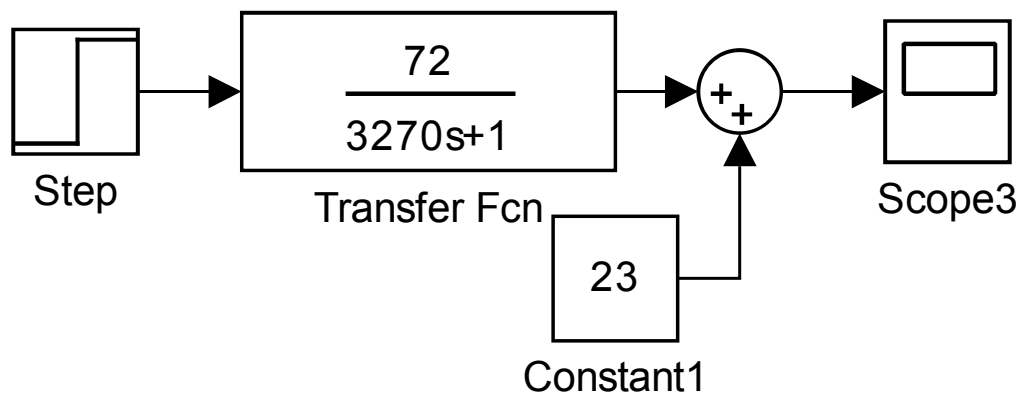


Figura 10: Implementación del sistema de temperatura en Simulink

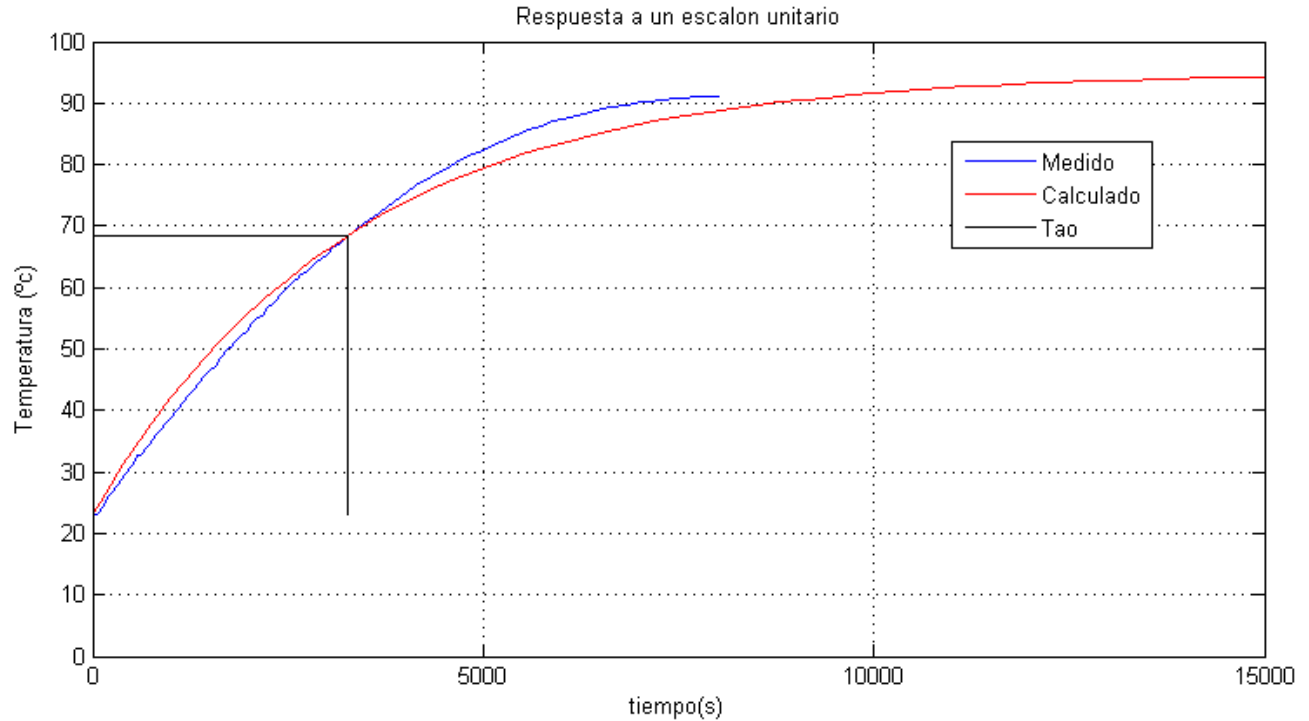


Figura 11: Dinámica del sistema de temperatura real y calculada

En la figura 11 se consignan los datos medidos sobre la planta de temperatura en color azul, comparándose con los datos en color rojos obtenidos de respuesta del sistema implementado en simulink.

### 8.1.2. Modelado del sistema de nivel de líquido

Para el modelo del sistema de nivel de líquido se abre al máximo (manualmente) la válvula de salida, se enciende la motobomba y se excita la electro válvula de entrada al máximo (20mA continuos) hasta que el sistema se estabilice durante un tiempo de 10 minutos (600s), se debe tener en cuenta, que el sistema se estabilizara cuando el caudal de entrada que es fijo sea igual al caudal de salida, que aumenta proporcionalmente con la altura ganada.

Al igual que en el sistema de temperatura se obtienen los valores a través de la DAQ, que son

entregados por un sensor ultrasónico (U-GAGE Serie T30) indicando el nivel alcanzado en el tiempo por el líquido; dichos valores son obtenidos por un algoritmo en matlab y son consignados en la gráfica azul de la figura 13

Con valores obtenidos se calculó el delta de nivel.

$$\Delta N = 33 - 5 = 28$$

Se calculó el valor del nivel al cual se tenía el primer tao

$$N = 28 * 0,632 + 5 = 22,69$$

Con este valor se obtuvo gráficamente el tiempo del primer tao, en la gráfica negra de la figura 13.

$$\tau = 140s$$

Con estos valores obtenidos del tiempo del tao y el delta de nivel, se construyó en simulink la función de transferencia de primer orden como se observa en la figura 12; posteriormente se consigna en la gráfica roja de la figura 13.

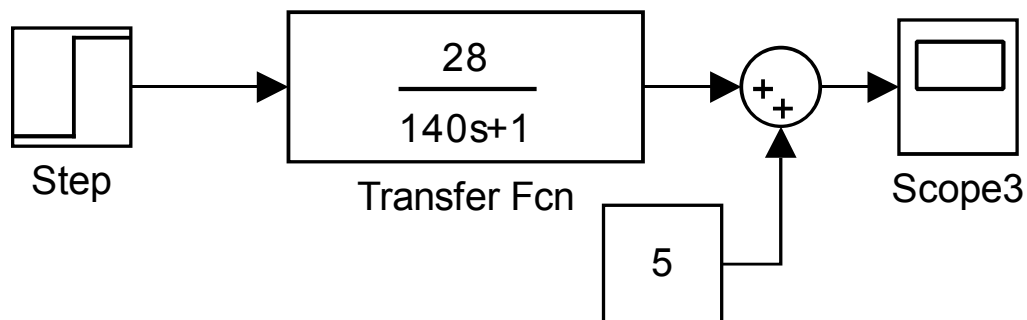


Figura 12: Implementación del sistema de nivel en Simulink



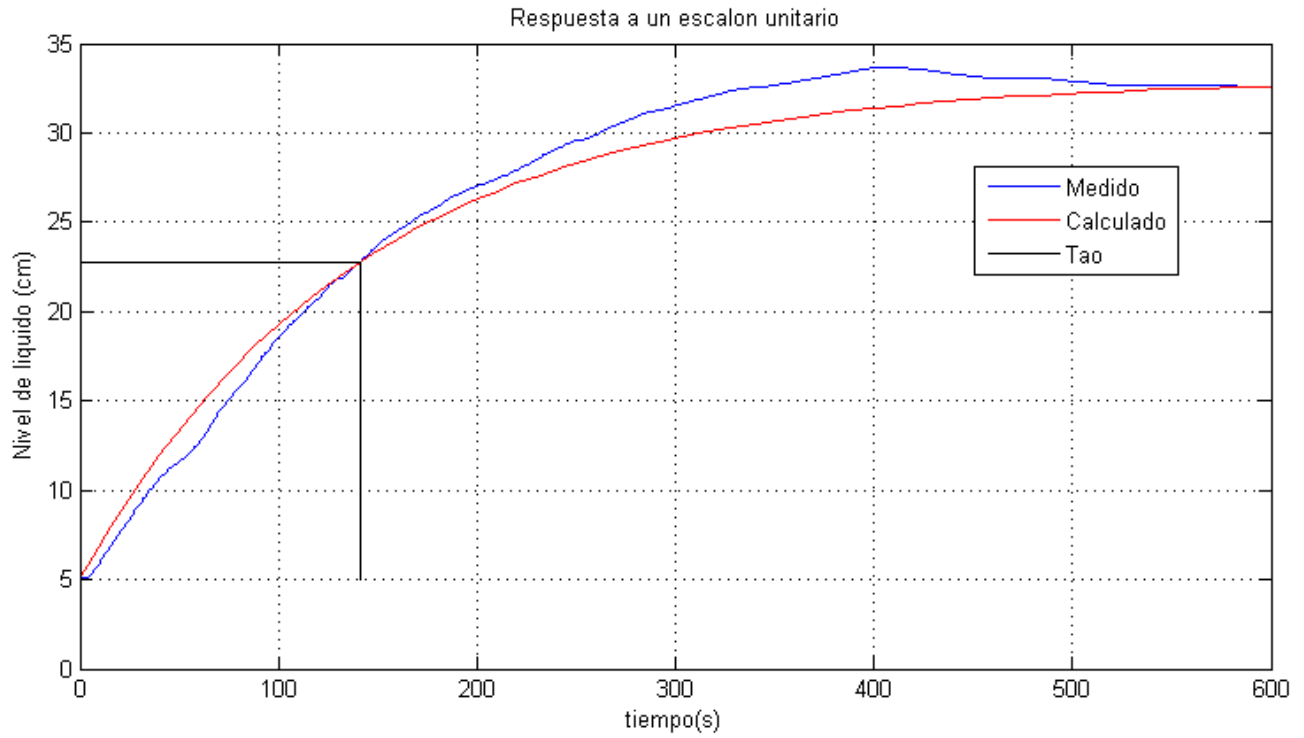


Figura 13: Dinámica del sistema nivel real y calculado

En la figura 13 se consignan los datos medidos sobre la planta de nivel en color azul, comparándose con los datos en color rojos obtenidos de respuesta del sistema implementado en simulink.

## 8.2. Implementación de un control ON OFF

Esta sección contiene diseños de controladores ON OFF para el sistema de nivel y de temperatura implementados a través del controlador maxthermo; además de un control ON OFF con banda para la temperatura, implementado a través del autómata programable Twido de Sneyder.

### 8.2.1. Control ON OFF para la temperatura del sistema con dispositivo maxthermo

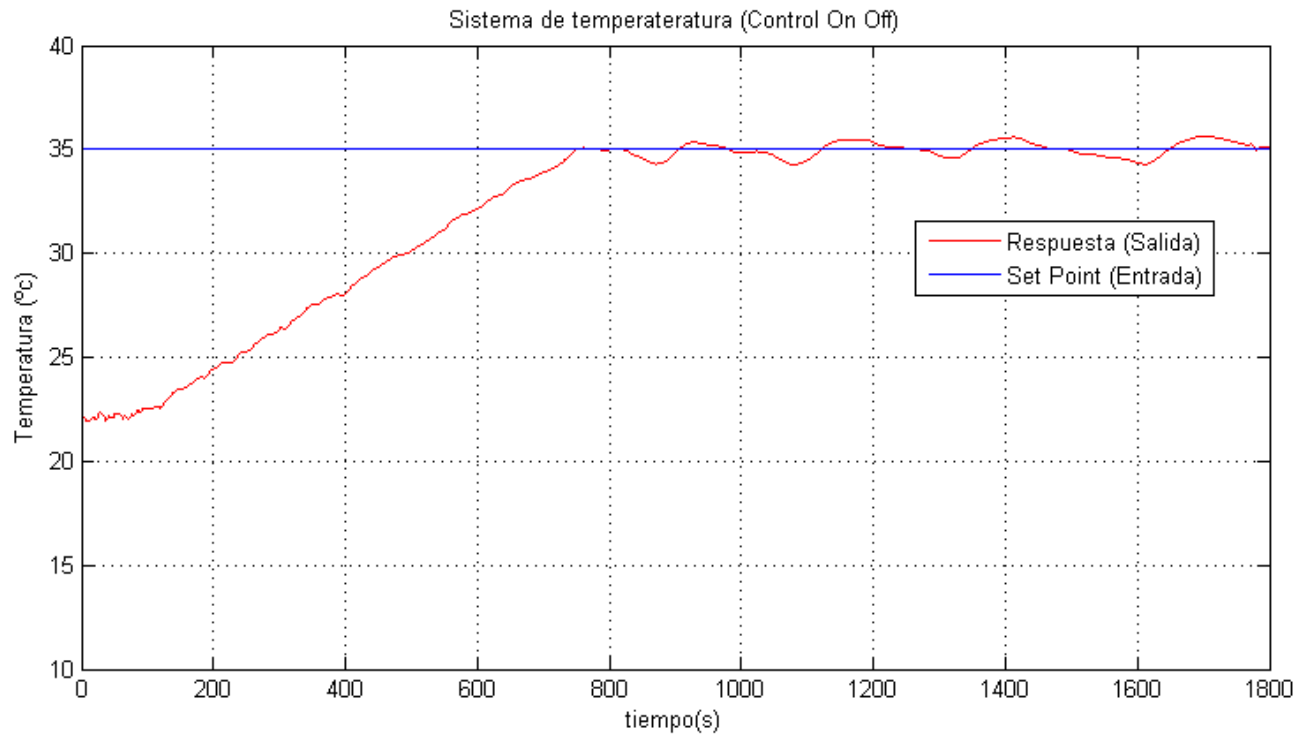


Figura 14: Implementación control 'ON OFF' del sistema de temperatura

Se puede observar que el sistema se lleva a una temperatura de 35° C y que al ser un control On-Off tiene un tiempo de subida rápido de 750 segundos, pero el sistema no es capaz de estabilizarse en un punto de referencia, sino que presenta oscilaciones permanentes.

### 8.2.2. Control ON OFF para el nivel del sistema con dispositivo Maxthermo

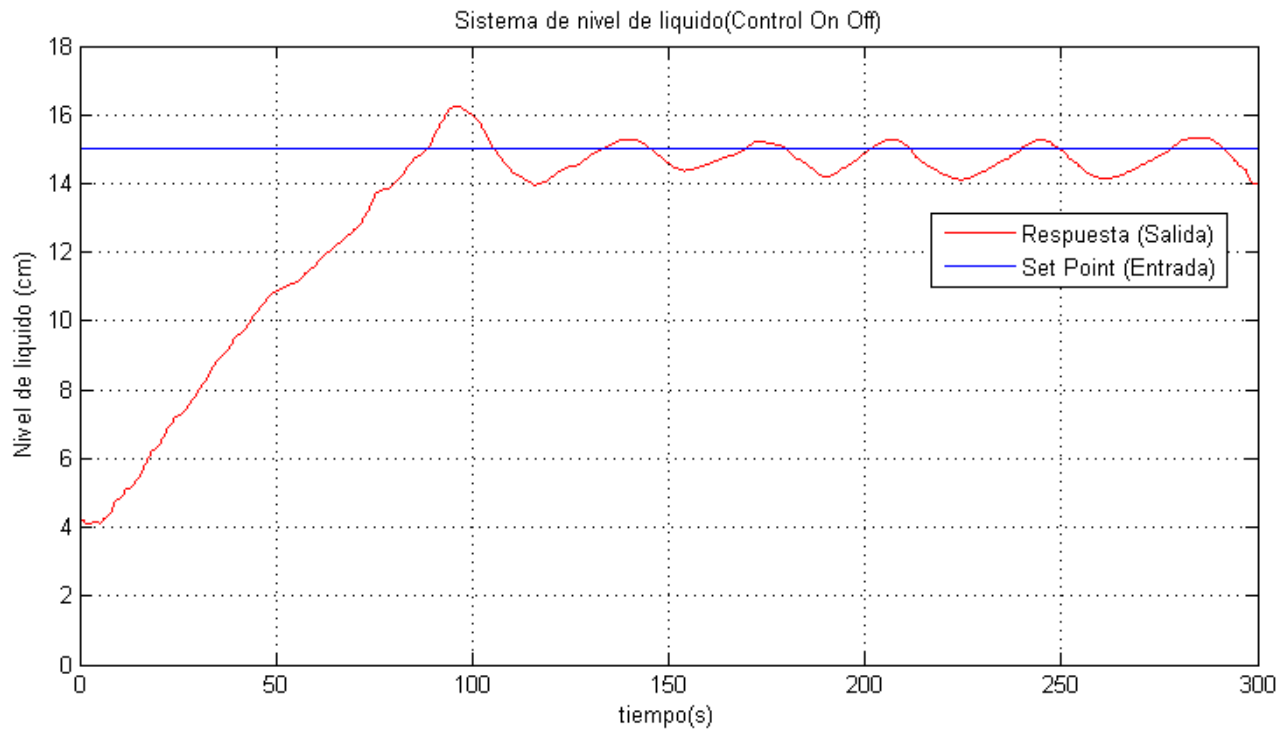


Figura 15: Implementación control 'ON OFF' del sistema de nivel

Se puede observar que el sistema se lleva a un nivel 15cm y que al ser un control On-Off tiene un tiempo de subida rápido de 90 segundos, pero el sistema no es capaz de estabilizarse en un punto de referencia, sino que presenta oscilaciones permanentes.

### 8.3. Control ON OFF con banda utilizando un autómata Twido Sneyder para la temperatura del sistema

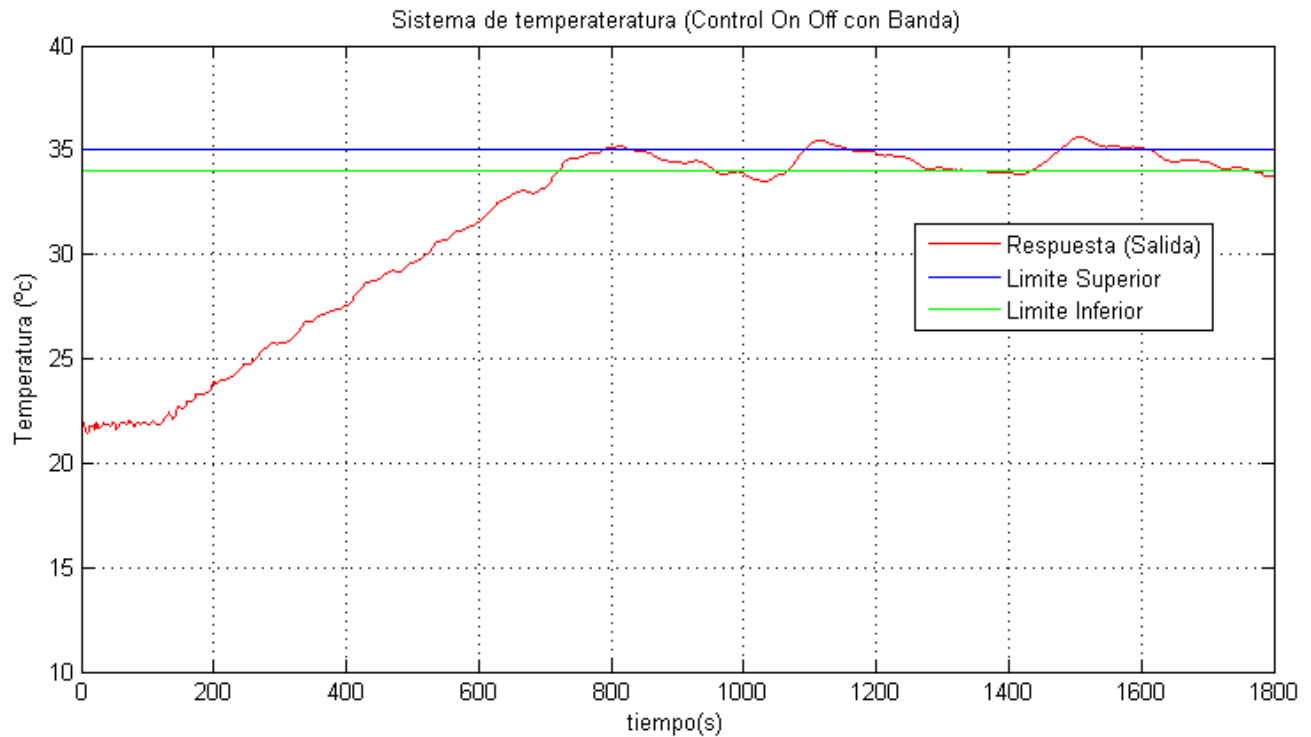


Figura 16: Implementación control 'ON OFF' con banda' del sistema de temperatura

Al igual que la figura 14 el sistema alcanza la temperatura objetivo en un tiempo igual al del control On-Off sin banda pero se diferencia de que este sistema presenta menor cantidad de fluctuaciones pero con un error de estado estacionario mayor.

### 8.4. Implementación de controladores PID en dispositivos maxthermo

Con el objetivo de mejorar las respuestas obtenidas con los controles ON OFF, se diseñaron e implementaron diferentes controles como son el control P, control PI y control PID y se pudo

evidenciar que el comportamiento alcanzo una respuesta más óptima.

#### 8.4.1. Control proporcional integral derivativo para la temperatura del sistema

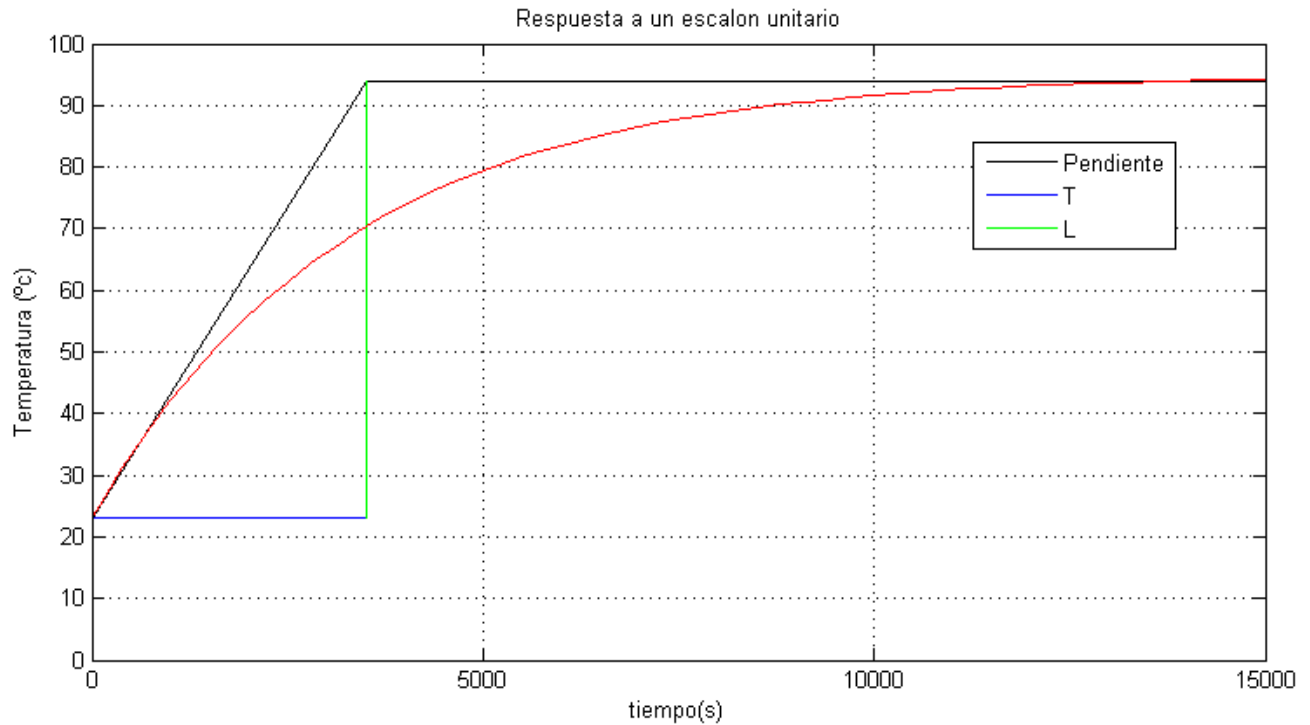


Figura 17: Constantes 'T y L' del sistema de temperatura

De la figura 17 se obtuvieron los respectivos valores de

$$T = 3500s$$

$$L = 72c$$

Con los valores anteriores y utilizando las ecuaciones del cuadro 3, se calcularon las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , las cuales fueron convertidas a sus correspondientes equivalencias de BP, Ti y Td para los diferentes tipos de control.

Controlador Temperatura	$K_p$	$P_b$	$K_i$	$T_i$	$K_d$	$T_d$
<b>P</b>	48,61	2,05	0	0	0	0
<b>PI</b>	43,75	2,28	0,0041	240	0	0
<b>PID</b>	58,33	1,71	0,0069	144	36	36

Cuadro 4: Controladores PID de temperatura

En cuadro 4 podemos apreciar las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  calculadas para los diferentes controles tipo P, PI y PID, con los respectivos equivalentes de  $P_b$ ,  $T_i$  y  $T_d$  que son los valores que se ingresaron al dispositivo controlador.

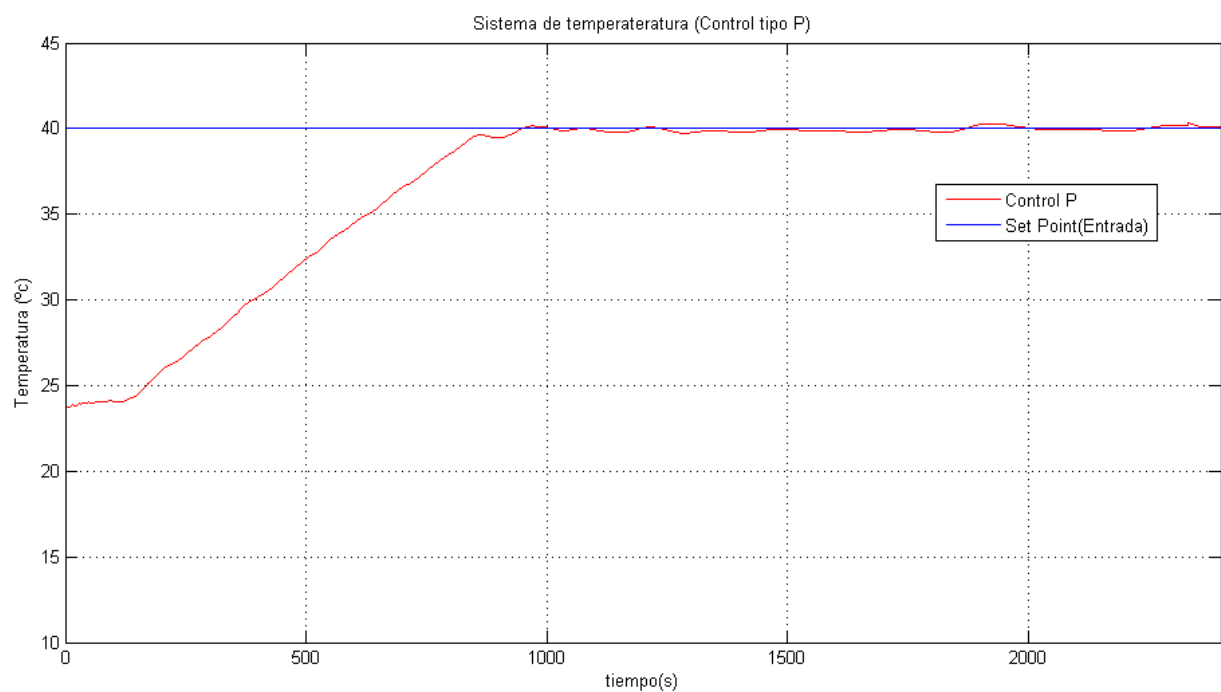


Figura 18: Implementación control 'P' del sistema de temperatura

Para este primer control tipo P, se puede observar un tiempo de subida de alrededor de 800 segundos y en la respuesta de estado estacionario, pequeñas fluctuaciones que no superan los  $\pm 0,5^{\circ}C$

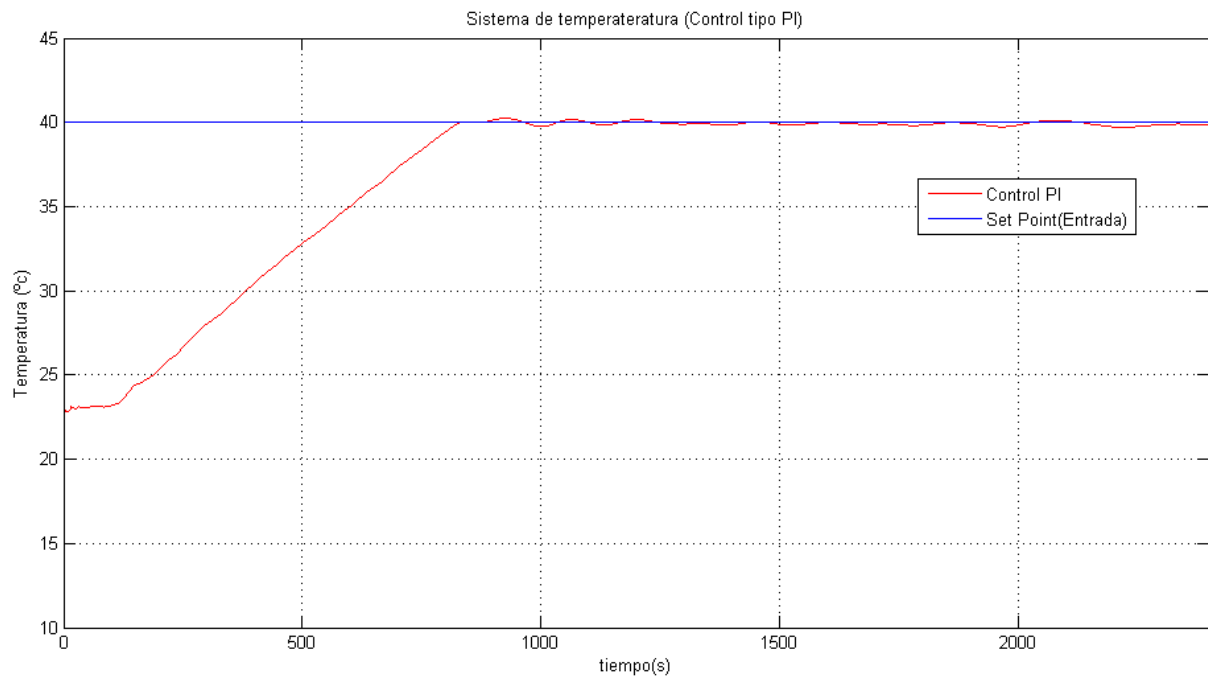


Figura 19: Implementación control 'PI' del sistema de temperatura

Para el segundo control tipo PI, se tienen muchas similitudes con el primero, se observar un tiempo de subida de alrededor de 800 segundos y en la respuesta de estado estacionario, pequeñas fluctuaciones que no superan los  $\pm 0,5^{\circ}C$ .

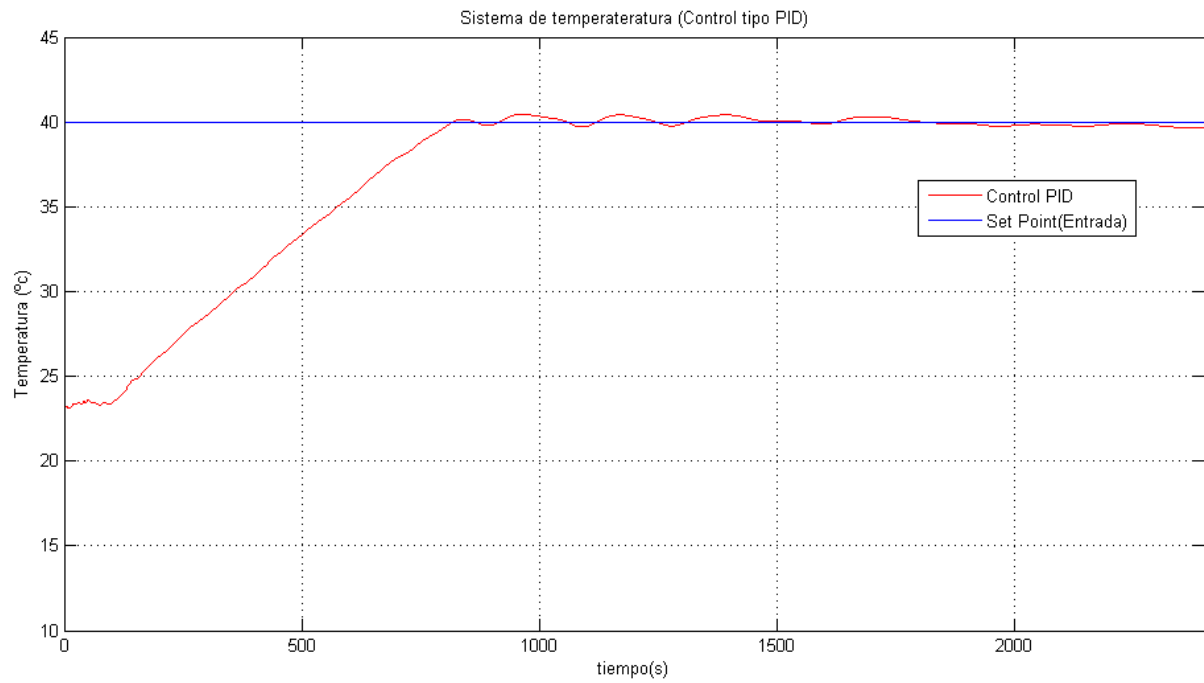


Figura 20: Implementación control 'PID' del sistema temperatura

Por ultimo para el control tipo PID, nuevamente se tienen muchas similitudes con el primero y segundo control, se observar un tiempo de subida de alrededor de 800 segundos y en la respuesta de estado estacionario, pequeñas fluctuaciones que no superan los  $\pm 0,5^{\circ}C$



#### 8.4.2. Control proporcional integral derivativo para el nivel del sistema

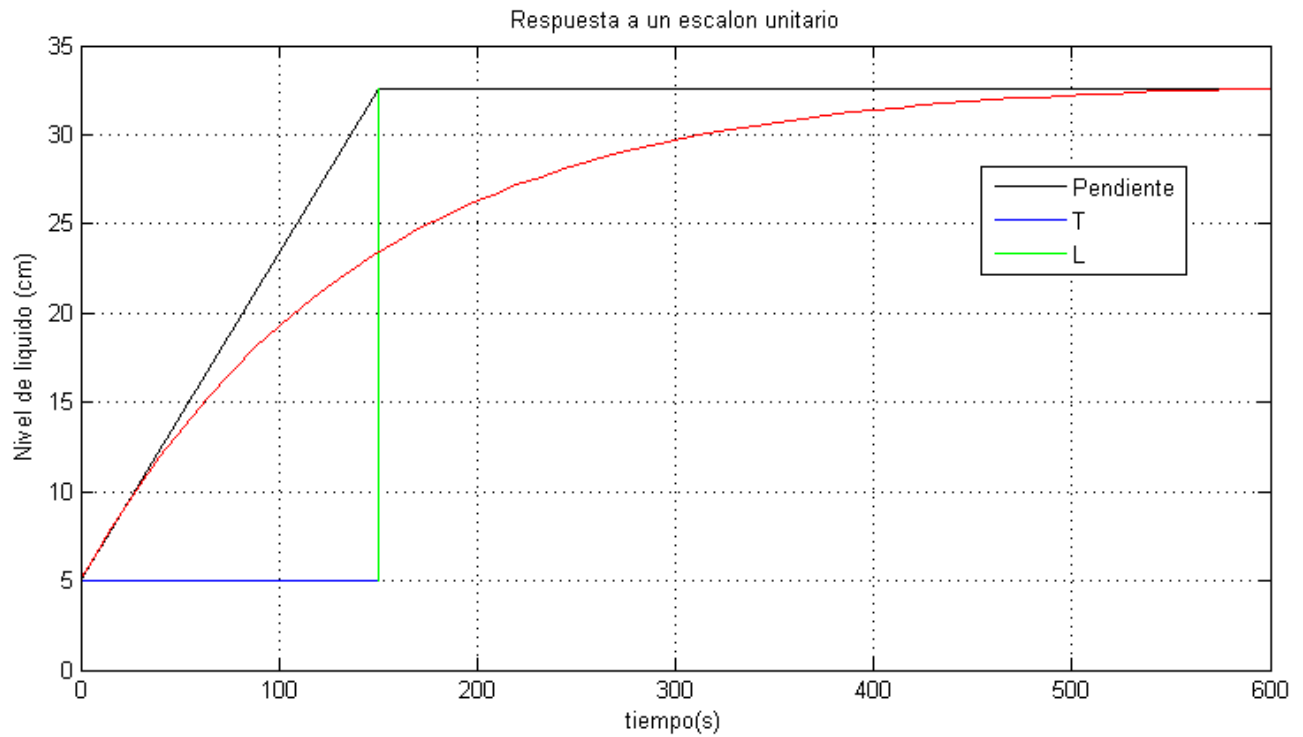


Figura 21: Constantes 'T y L' del sistema de nivel

De la figura 20 se obtuvieron los respectivos valores de

$$T = 150s$$

$$L = 29c$$

Con los valores anteriores y utilizando las ecuaciones del cuadro 3, se calcularon las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , las cuales fueron convertidas a sus correspondientes equivalencias de BP,  $T_i$  y  $T_d$  para los diferentes tipos de control.

Controlador Nivel	$K_p$	$P_b$	$K_i$	$T_i$	$K_d$	$T_d$
<b>P</b>	5,17	19,33	0	0	0	0
<b>PI</b>	4,66	21,48	0,0103	96,66	0	0
<b>PID</b>	6,21	16,11	0,0172	58	14,5	14

Cuadro 5: Controladores PID del nivel

En cuadro 5 podemos apreciar las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  calculadas para los diferentes controles tipo P, PI y PID, con los respectivos equivalentes de  $P_b$ ,  $T_i$  y  $T_d$  que son los valores que se ingresaron al dispositivo controlador.

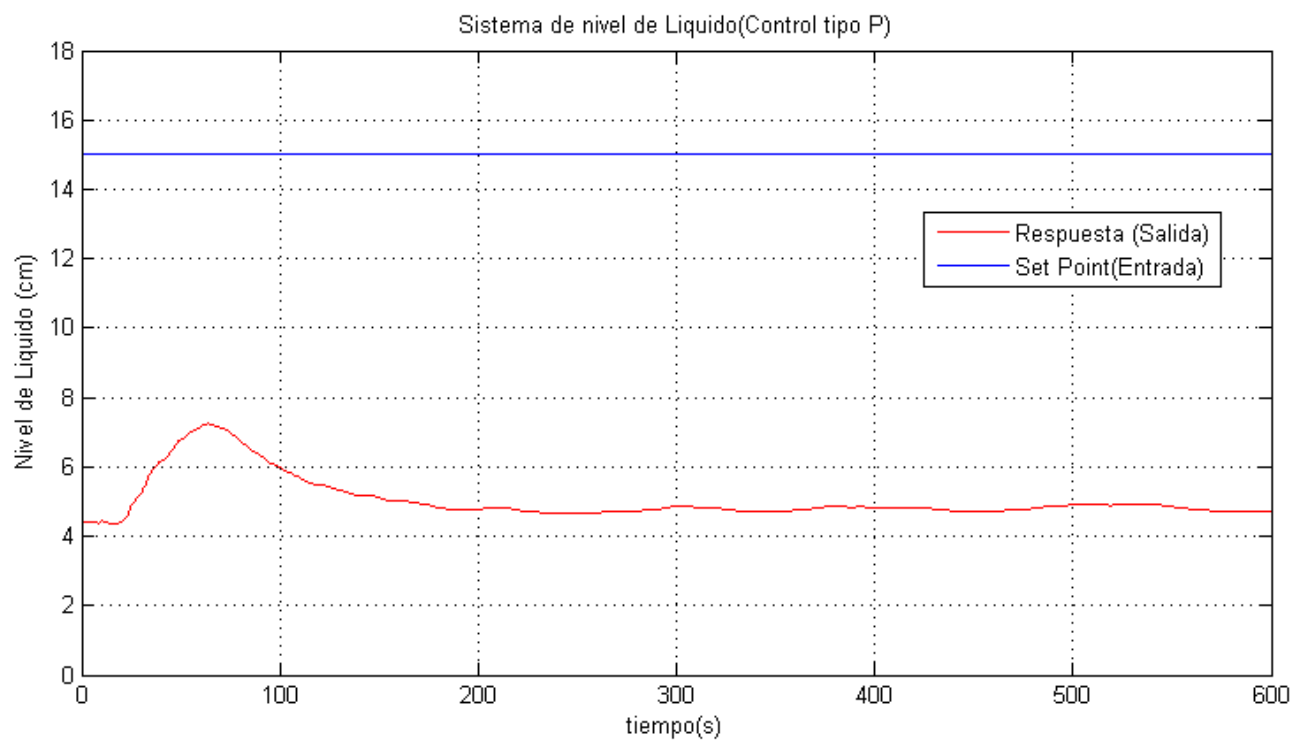


Figura 22: Implementación control 'P' del sistema de nivel

Se observa en la figura 21 que el sistema tiene un evidente error de estado estacionario, el cual no se corrige debido a que el controlador solo cuenta con constante proporcional.

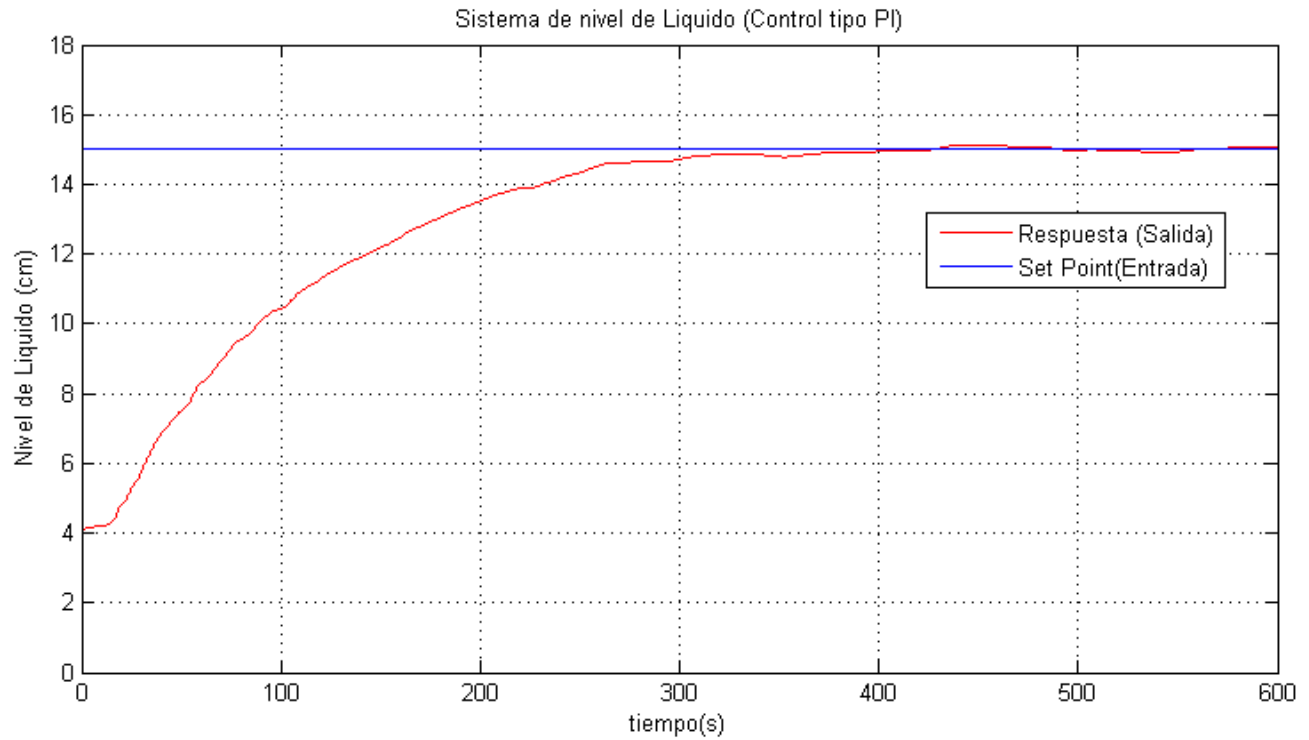


Figura 23: Implementación control 'PI' del sistema de nivel

Se observa en la figura 22 que el sistema corrige el error de estado estacionario y se estabiliza, debido a que el controlador cuenta con constante proporcional e integral, además de que posee un tiempo de subida de 240s.

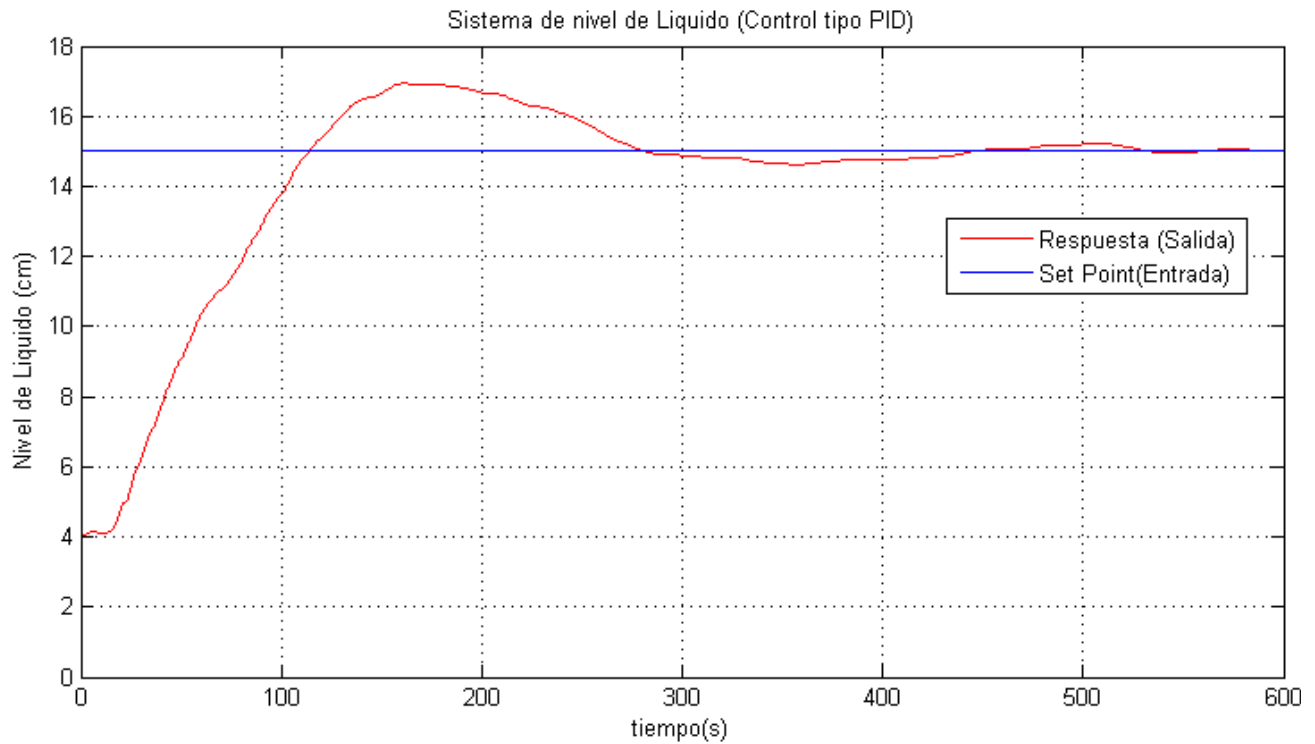


Figura 24: Implementación control 'PID' del sistema de nivel

Al igual que en la figura 22 se observa en la figura 23 que el sistema corrige el error de estado estacionario y se estabiliza, debido a que el controlador cuenta con constante proporcional, integral y derivativa, pero le agrega un sobrepaso ya que el tiempo de subida es más pequeño de 110s comparado con el tiempo del PI.

## 8.5. Elaboración de guías para el desarrollo de las prácticas

Como parte final de este proyecto se construyeron guías para el desarrollo de prácticas en el laboratorio de relevación, las cuales se enumeraran al final de este párrafo, donde cada una de ellas estará constituida inicialmente de una explicación de la configuración que debe realizarse a cada equipo, según la práctica a realizar; seguido del proceso a ejecutar sobre la planta.

- Construcción de la dinámica de primer orden para el sistema de temperatura
- Construcción de la dinámica de primer orden para el sistema de nivel
- Implementación de estrategias de control ON-Off y PID para el sistema de temperatura, utilizando el dispositivo controlador Maxthermo MC5438-201000.
- Implementación de estrategias de control ON-Off y PID para el sistema de nivel, utilizando el dispositivo controlador Maxthermo MC5438-301000
- Implementación de control ON-Off con banda para el sistema de temperatura, utilizando el PLC Twido de Sneyder Electric TWD LCDE 40DRF

Todas las guías para el desarrollo de las prácticas nombradas anteriormente se incluirán en el proyecto como anexos.

## 9. Conclusiones, recomendaciones y aportes

- En la concepción de este proyecto se realizó el debido acondicionamiento y configuración de los equipos presentes en el laboratorio, permitiendo el adecuado desarrollo de las pruebas, con el ánimo de alcanzar los objetivos planteados.
- Se evidencia la obtención adecuada de los modelos, tanto para el nivel como para la temperatura, al comparar los modelos de primer orden calculados con los datos obtenidos a través de la DAQ y posteriormente al obtener una adecuada respuesta de los controladores calculados sobre las plantas ideales.
- Con ánimo de enriquecer el contenido del proyecto, se realizó un controlador ON OFF con banda sobre la planta de temperatura con un dispositivo PLC Twido Sneyder, obteniendo una respuesta en donde el sistema reducía el número de activaciones del actuador lo cual es esencial para funcionamiento de este dispositivo controlador.
- Para el cálculo de los controladores PID Se eligió la metodología de respuesta la escalón unitario de Ziegels nichos, dado que las plantas se ajustaban a modelos de primer orden sin retardo.
- El control de los sistema tanto de nivel de líquido como de temperatura, mejoran su respuesta medida que este evoluciona, pasando del ON OFF hasta el PID.
- A la hora de utilizar la DAQ como dispositivo de adquisición se debe tener en cuenta que presentan ruido en la medida obtenida, por lo tanto se hace necesaria la utilización de filtros digitales para obtener una respuesta adecuada.
- Para la utilización de la salida digital del PLC Twido se deba tener en cuenta que el mínimo periodo de conmutación debe ser de 2 segundos por lo tanto se recomienda trabajar para plantas de respuesta lenta.
- El visualizador de nivel o columna de líquido es un medidor de presión hidrostática que presenta errores debido a que no se encuentra conectado directamente al tanque sino a la

tubería de salida por lo tanto cuando se abre la válvula de salida, y se presenta un flujo de salida que produce grandes errores en la medida

- Como aporte se anexan un conjunto de guías para el desarrollo de diferentes prácticas como concepción de modelos y ejecución de modelos de control On-Off o PID sobre las plantas

$$\Delta = VF_{-} - VI$$

$$M = \Delta * 0,632 + VI$$

$$\tau = Tiempo$$

## Referencias

- [1] D. A. Álzate, “Control y medida de nivel de liquido con señales de ultrasonido,” 2010.
- [2] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna 4<sup>a</sup> edición*.
- [3] Medición de la variable temperatura. Consultado el 12 de junio de 2013. [Online]. Available: <http://es.scribd.com/doc/23494756/MEDICION-DE-LA-VARIABLE-TEMPERATURA-1ra-Parte>
- [4] R. A. Pallas, *Introducción a sensores y acondicionadores de señal*, vol. Capítulo 1.
- [5] J. C. V. Guzmán and Ángel Arturo Hernández De La O, *Sensores*. Instituto Tecnológico de Villahermosa, Mexico, 2011.
- [6] *U-GAGE T30 Series with Analog and Discrete Outputs*.
- [7] Danfoss, *Folleto técnico, Válvulas solenoides proporcionales servoaccionadas de 2 vías Tipo EV260B*, Danfoss A/S (RC-MDP / RJA), 2014-10.
- [8] M. E. L. Guillen, *Identificación de sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua*.
- [9] D. Giraldo and E. Giraldo, *Teoría de control análogo*, Produmedios, Ed. Pereira, 2009.
- [10] I. T. e. s. e. Universidad de Alcala, *Identificacion de parametros de un motor DC*.
- [11] Capitulo 4. controladores. Consultado el 26 de mayo2014. [Online]. Available: [http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion\\_y\\_Control/Ivan\\_Velazquez/Catedra/Capitulo%204.%20Controladores.pdf](http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion_y_Control/Ivan_Velazquez/Catedra/Capitulo%204.%20Controladores.pdf)
- [12] S. E. T. Chojolán, *Diseño de controladores pid en tiempo discreto, y análisis de respuesta utilizando herramientas computacionales*, e. d. i. m. e. universidad de san carlos de guatemala, facultad de ingenieria, Ed. Guatemala, octubre de 2007.



- [13] E. G. Moreno, *Automatización de Procesos Industriales*, Alfaomega, Ed. Mexico, 2001, consultado el 23 de agosto de 2013.
- [14] *Control Industrial. Guía del estudiante. Versión 1.1 en castellano.*
- [15] Acciones de control. capítulo 1. Consultado el 26 de mayo de 2014. [Online]. Available: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/nunez\\_e\\_f/capitulo1.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/nunez_e_f/capitulo1.pdf)
- [16] I. E. U. F. D. P. S. Gerson Fabian Uribe Ramón COD: 1090544, Erney Fabian Castro Becerra COD: 1090533 & Ernesto Osorio Estupiñán COD: 1090182 FACULTAD DE INGENIERIA, “Controlador pid para nivel de tanque de la unidad didáctica rt614 gunt hamburg,” 2014.05.
- [17] A. S.A., *Arian. Control e Instrumentación*, nota técnica 11, rev. d, <http://www.arian.cl> 1 ed., ARIAN S.A., Octubre 2003.